

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Механіко-машинобудівний інститут**

**Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»**

«На правах рукопису»  
УДК 621.941

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ В.А.Пасічник  
(підпис)

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування  
(код і назва)

на тему: Оброблення зубчастих коліс за допомогою магнітно-абразивної обробки методом безперервного окату

Виконав (–ла): студент (–ка) 6 курсу, групи Мі-71мн  
(шифр групи)

\_\_\_\_\_ Трухан Олександр Олегович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доц.каф ІТМ, д.т.н.доц Охріменко О.А. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_  
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент п.н.с. ІНМ ім.Бакуля НАН України, д.т.н.,Сохань С.В. \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут (факультет) ) Механіко-машинобудівний

Кафедра «Інтегровані технології машинобудування»

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 8.05050302 Інструментальне виробництво

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ В.А.Пасічник  
(підпис)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ  
на магістерську дисертацію студенту**

Трухан Олександр Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Оброблення зубчастих коліс за допомогою магнітно-абразивної обробки методом безперервного обкату

науковий керівник дисертації Охріменко О.А., д.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження Магнітно-абразивний інструмент для оброблення зубчастих коліс

4. Предмет дослідження Процеси фінішної обробки зубчастих коліс МАІ методом неперервної обкатки

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Провести аналіз сучасного стану МАО циліндричних зубчастих коліс і проблем її удосконалення, розробити формоутворення дисковим інструментом зубчастих коліс, провести аналіз

формоутворення зубчастих коліс та розробку інструмента, провести лабораторні дослідження, розробити стартаппроект.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

7. Орієнтовний перелік публікацій \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

8. Консультанти розділів дисертації\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації \_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

\_\_\_\_\_

\* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

## **АНОТАЦІЯ**

**Трухан О.О. Оброблення зубчастих коліс за допомогою магнітно-абразивної обробки методом безперервного обкату.**

Дисертація на здобуття освітньо - наукового ступеня магістра за спеціальністю 133 – галузеве машинобудування. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» – Київ 2019 рік.

Виконано аналіз методів фінішної обробки зубчастих коліс та визначено їх переваги та недоліки.

В роботі досліджено методи фінішних операцій над зубчастими колесами, а також інструменти, які виконують ці операції, на основі яких і був створений новий інструмент та описана його робота та наладка.

Зроблені висновки, щодо роботи цього інструменту, а також практичним шляхом доведена його роботоздатність. Встановлено, що інструмент роботоздатний та може використовуватись для фінішної операції зубчастих коліс.

**Ключові слова:** зубохонінгування, магнітно-абразивне оброблення, фінішна обробка зубчастих коліс, шорсткість.

## **SUMMARY**

**Trukhan O.O. Machining of toothed wheels using the magnetic-abrasive processe in a continuous run.**

Dissertation for obtaining a educational-scientific degree in specialty 133 – branch mechanical engineering. – National Technical University of Ukraine " Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute ". - Kyiv, 2019

The methods of finishing operations on gear wheels, as well as the tools that perform these operations, on the basis of which a new tool was created and described its work and adjustment, are described in this work.

Conclusions have been drawn regarding the work of this tool, as well as the practical application of its workability. It is found that the tool is robust and can be used for the finishing operation of gear wheels.

**Key words:** tooth honing, magnetic abrasive machining, finishing of gear wheels, roughness.

## **РЕФЕРАТ**

Магістерська дисертація на тему «Оброблення зубчастих коліс за допомогою магнітно-абразивної обробки методом безперервного обкату» містить 95 сторінок пояснювальної записки, рисунків – 44, таблиць – 25, використаних джерел – 76.

### **Актуальність теми**

Зубчасті колеса є одними із найбільш масових і використовуваних деталей в сучасному машинобудуванні. Існуючі технології виготовлення зубчастих коліс мають свої недоліки, а особливо фінішні операції, призводять до виходу із ладу зубчастих передач з різних причин, а саме: передчасне зношування, заїдання, залишкових деформацій, контактної втоми, тріщин та руйнування зубів в зубчастих колесах. Саме тому в даній дисертації вирішувалась проблема, за допомогою метода МАО фінішної операції над зубчастими колесами.

### **Мета дослідження**

Метою роботи є удосконалення процесу фінішної обробки зубчастих коліс за рахунок використання магнітно-абразивної обробки методом безперервного обкату.

### **Задачі дослідження:**

1. Провести аналіз сучасного стану МАО циліндричних зубчастих коліс і проблем її удосконалення;
2. Розробити формоутворення дисковим інструментом зубчастих колі;
3. Провести аналіз формоутворення зубчастих коліс та розробку інструмента;
4. Провести лабораторні дослідження;
5. Розробити стартап проект;

**Об'єкт дослідження** – магнітно-абразивний інструмент для обробки зубчастих коліс.

**Предмет дослідження** – процеси фінішної обробки зубчастих коліс МАІ методом неперервної обкатки.

### **Наукова новизна.**

Розроблені теоретичні основи просторового формоутворення дисковим інструментом деталей періодичного профіля.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практично було доведено, що дисковий інструмент для фінішної обробки зубів зубчастих коліс є робото здатним, це можна побачити за зміною виміряної шорсткості поверхні зубів зубчастого колеса, яке було оброблене цим інструментом.

**Публікації.** По темі магістерської дисертації була подана одна теза.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ .....	8
<b>Вступ</b> .....	9
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МАО ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС І ПРОБЛЕМ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ</b> .....	10
1. Аналіз сучасних методів фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс .....	10
1.2 Методи безрозмірної фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс .....	10
1.2.1 Зубохонінгування .....	10
1.2.2 Зубохонінгування з внутрішнім зачепленням .....	12
1.2.3 Конструкція зубчастих хонів .....	13
1.2.4 Зубохонінгування дисковим хоном .....	15
1.3 Полірування зубчастих коліс .....	16
1.3.1 Хіміко- механічне полірування зубчастих коліс .....	17
1.3.2 Електрохімічне полірування зубчастих коліс .....	18
1.4 Гідроабразивна обробка зубчастих коліс .....	19
1.5 Дробоструменева обробка зубчастих коліс .....	20
1.6 Віброабразивна обробка зубчастих коліс .....	22
1.7 Магнітно-абразивна обробка зубчастих коліс за допомогою експериментальної роторної установки .....	24
1.8 Показники якості зубчастих передач .....	25
<b>Висновки</b> .....	26
<b>РОЗДІЛ 2. ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС</b> .....	28
2.1 Загальні положення формоутворення дисковим інструментом .....	28
2.2 Узагальнена схема формоутворення циліндричних зубчастих коліс при обробці інструментом у формі диску .....	29
2.3 Модель дискового інструменту .....	32
2.4 Визначення спряженої поверхні зубчастих коліс при їх формоутворенні поверхнею дисковим інструментом .....	36
2.5 Графічний спосіб визначення зазорів між дисковим інструментом та поверхнею зубчастого колеса при обробці на зубофрезерному верстаті ..	39
<b>Висновки</b> .....	43
<b>РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТУ</b> .....	44
3.1 Вибір матеріалу інструмента .....	44
3.2 Визначення типу і матеріалу постійного магніту для його застосування при створенні дискового інструменту .....	44
3.3 Конструкція дискового інструменту .....	45
<b>Висновки</b> .....	48



<b>РОЗДІЛ 4. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....</b>	<b>49</b>
4.1 Матеріали які використовувались в ході проведення лабораторних досліджень .....	49
4.2 Магнітно-абразивний порошок, який використовувався для дослідження МАО циліндричного зубчастого колеса .....	51
4.3 Зубофрезерний напівавтомат 5А312 на якому виконувалось МАО.....	52
4.4 Налаштування та режими верстату, який використовувались в ході проведення лабораторних експериментів.....	55
4.5 МАО циліндричних зубчастих коліс.....	61
4.6 Результати лабораторних досліджень .....	62
4.7. Модернізація конструкції дискового інструмента.....	65
<b>Висновки.....</b>	<b>67</b>
<b>РОЗДІЛ 5.СТАРТАП ПРОЕКТ РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС.....</b>	<b>68</b>
5.1 Опис ідеї проекту та її зміст .....	68
5.2 Можливі напрямки застосування.....	69
5.2.1 Основні вигоди, що може отримати користувач товару.....	69
5.3 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	70
5.4 Технологічний аудит ідеї проекту .....	73
5.4.1Технологічна здійсненність ідеї проекту.....	73
5.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	74
5.6 Аналіз ринкового середовища.....	76
5.7 SWOT-аналіз.....	79
5.8 РОЗРОБКА РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ.....	81
5.8.1 Опис цільових груп споживачів.....	81
5.8.2 Стратегія конкурентної поведінки.....	82
5.9 РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ .....	82
5.9.1 Маркетингова концепція товару.....	82
5.9.2 Визначення цінових меж товару.....	83
5.9.3 Визначення оптимальної системи збуту.....	83
<b>Висновок.....</b>	<b>84</b>
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>85</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>86</b>
Додаток А.....	93
Додаток Б.....	94

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

### *1. Скорочення*

МАО – магнітно-абразивне оброблення;

МАП – магнітно-абразивний порошок;

ВІП – вихідна інструментальна поверхня;

## **Вступ**

Зубчасті колеса є одними із найбільш масових і використовуваних деталей в сучасному машинобудуванні. Існуючі технології виготовлення зубчастих коліс мають свої недоліки, а особливо фінішні операції, призводять до виходу із ладу зубчастих передач з різних причин, а саме: передчасне зношування, заїдання, залишкових деформацій, контактної втоми, тріщин та руйнування зубів в зубчастих колесах.

Різні науково-технічні джерела та ГОСТ 31381-2009 рекомендують застосовувати до робочих поверхонь зубів зубчастих коліс підвищення чистоти обробки, підвищення поверхневої твердості, формування залишкових напружень стискання, зменшення контактних напружень, забезпечення наявності фасок або округлень на кромках забезпечують попередження тріщин по межі зміцненого шару та усунення можливих концентраторів напружень у впадині зубів зубчастих коліс.

Існуючі методи, маючи свої недоліки, також являються досить затратними способами для фінішного оброблення зубчастих коліс. Магнітно-абразивна обробка (МАО) є ефективним і потенційно менш затратним способом, який дозволяє забезпечити комплексно і обробку і зміцнення при поверхневого шару матеріалу. Його впровадження для фінішної обробки зубчастих коліс гальмується недостатнім вивченням процесу обробки, зокрема його кінематики, відсутність ефективних схем обробки, відповідного обладнання та рекомендацій з його проектування, тому дослідження направлене на створення фінішного методу магнітно-абразивної обробки для оброблення зубчастих коліс.

Метою роботи є удосконалення процесу фінішної обробки зубчастих коліс за рахунок використання магнітно-абразивної обробки методом безперервного обкату.

Об'єктом дослідження є магнітно-абразивний інструмент (МАІ) для обробки зубчастих коліс.

Предметом дослідження є процеси фінішної обробки зубчастих коліс магнітно-абразивним інструментом (МАІ) методом безперервної обкатки.

# **РОЗДІЛ 1.**

## **АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ МАО ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС І ПРОБЛЕМ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ**

### **1. Аналіз сучасних методів фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс**

#### **1.2 Методи безрозмірної фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс**

Методи обробки зубчастих коліс без зняття стружки та фінішна обробка знаходять все більше застосування в машинобудуванні. Ці методи досить різняться між собою з фізичної суті, їх об'єднує лише те, що вони дозволяють формувати поверхневий шар деталі із заданими стабільними властивостями, а саме: зменшення шорсткості, підвищення точності розмірів та ін.

До таких методів можна віднести зубохонінгування, механічне полірування, хіміко-механічне полірування, електрохімічне полірування, гідро абразивну обробку, віброполірування та ін.

##### **1.2.1 Зубохонінгування**

Для виправлення похибок основних параметрів зубчастого вінця в сучасному машинобудуванні використовують хонінгування термічно оброблених зубчастих коліс майже всіх типів. Для даного процесу використовують абразивні або алмазні зубчасті хони – циліндричні зубчасті колеса або рейки (прямозубі або косо зубі), які мають відповідний вихідний контур. На бокових поверхнях зубів хона розміщений абразив або алмаз.

Зубохонінгування, як і шевінгування, технологічно одно типові процеси, тобто в цьому процесі також здійснюється взаємна обкатка оброблюючого колеса та хона з перехресними осями, в результаті якої за рахунок взаємного ковзання спряжених профілів з робочою поверхнею зуба колеса знімає невеликий шар матеріалу.

Отже, зубохонінгування являється високопродуктивним методом, який використовується для зменшення шорсткості поверхонь шевінгованих зубчастих коліс до  $R_a = 1,25 \dots 0,32$  мкм, зниження рівня шуму на 2...4 дБ, видалення невеликих забоїв та заусінців величиною до 0,3 мм і збільшення терміну служби загартованих зубчастих коліс після шевінгування або зубошліфування.

Сам процес зубохонінгування призначений для видалення невеликого припуску і виправлення невеликих похибок. Припуск з сторони зуба складає 0,01...0,03 мм і саме в цьому діапазоні здійснюється виправлення погрешностей в зубчастому зачепленні.

Зубохонінгування не підвищує температуру поверхні зуба, а також не викликає теплових тріщин, припалів і не знижує твердість поверхневого шару.

Під час зубохонінгування, яке оброблює зубчасте колесо знаходиться в щільному зачепленні з абразивним зубчастим хонем, який виконаний у вигляді косозубого зубчастого колеса при куті зкращення вісей  $10...15^\circ$ . Зубчасте колесо здійснює зворотно – поступальний рух паралельно своїй вісі. Направлення обертання хону змінюється при кожному ході столу. Беззасторожне зачеплення здійснюється при невеликому регулюванні тиску шляхом підтискання бабки інструмента до зубчастого колеса. Під час робочого циклу хон рухомий, він ніби слідує за похибками в зубах зубчастого колеса і тим самим попереджує поломку інструмента і зменшує ці похибки до визначених меж [1,2].

На рис.1.1 приведена схема зубохонінгування з радіальним навантаженням. В процесі зубохонінгування вершина і профіль зуба колеса 2 постійно контактують з впадиною і профілем зуба хона 1 в точках 4. Завдяки контакту зовнішнього діаметра колеса з впадиною зуба хона під невеликим тиском зуби колеса поступово впроваджуються в тіло хона і автоматично відновлюють його зуби, а на вершині зуба колеса утворюється невеликий радіус, який забезпечує плавний вхід зубів на початку зачеплення. Для запобігання поломки зубів, хон правлять по зовнішньому діаметру 3, це потрібно для підтримки необхідного радіального зазору 5.

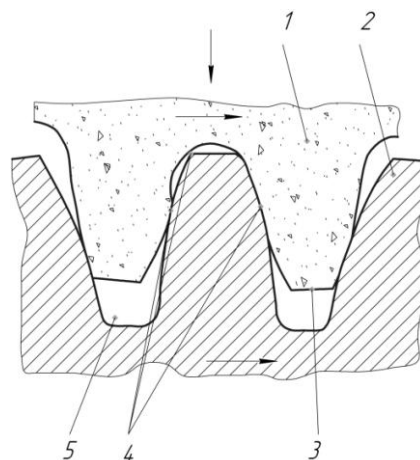


Рисунок 1.1 – Схема зубохонінгування з радіальним навантаженням  
1 – хон; 2 – зубчасте колесо; 3 – зовнішній діаметр хона; 4 – точки контакту; 5 – зазор між хонем і зубчастим колесом;

### 1.2.2 Зубохонінгування з внутрішнім зачепленням

Зубохонінгування також може здійснюватись зубчастим хонем з внутрішнім зачепленням, в порівнянні з обробкою хонем з зовнішнім зачепленням являється більш сучасним методом з широкими технологічними можливостями. Зачеплення зубчастого хону 1 (рис. 1.2) з заготовкою (зубчастим колесом) 2 здійснюється під кутом перехресування  $\gamma$ . При вільному кінематичному зв'язку веденим елементом являється хон, а при жорсткому зв'язку обертання хона і зубчастого колеса здійснюється роздільно з високою точністю синхронізації за рахунок електронної системи управління. Ширина хона більше ширини зубчастого колеса. Крім обертання зубчастий хон здійснює також радіальний рух подачі, а зубчасте колесо здійснює осьовий осцилюючий рух для покращення показників різання, амплітуда якого дорівнює 3...4 мм [1, 2].

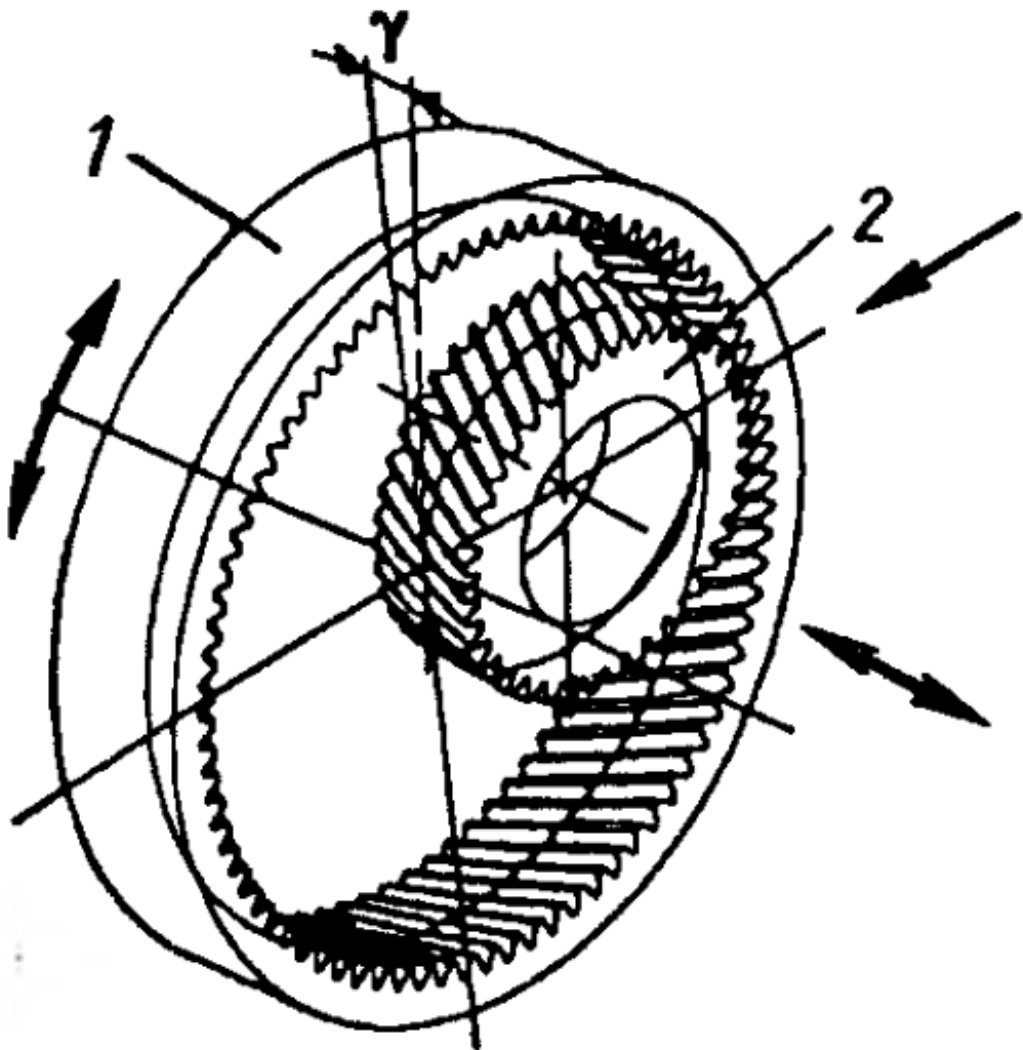


Рисунок 1.2 – Зубохонінгування з внутрішнім зачепленням [2]

1 – хон; 2 – зубчасте колесо;

### 1.2.3 Конструкція зубчастих хонів

Ефективність процесу зубохонінгування багато в чому визначається конструктивними особливостями зубчастого хону. Всі конструкції зубчастих хонів поділені на шість типів (табл.1.1) [11].

Зубчасті хони 1-го типу мають сталю втулку з прорізними пазами та литою абразивно-пластмасовий зубчастий вінець. Зубчасті хони типів 1а, 1б, 1в, відрізняються тільки розмірами. Після зношення або поломки зубів хона абразивний вінець сколюють та напресовують на втулку новий вінець. Простота конструкції зубчастих хонів цього типу зумовила найбільш широке використання їх в машинобудуванні.

Зубчасті хони 2-го типу відрізняються від 1-го типу зубчастих хонів тим, що між їх абразивним зубчастим вінцем і втулкою запресовується резинова прокладка товщиною 30 мм, що дозволяє хонінгувати зубчасті колеса в розпір без додаткових амортизуючих пристосувань.

Значним недоліком зубчастих хонів 1-го і 2-го типів являється низька міцність зубів хонів, внаслідок чого вони нерідко ламаються в процесі експлуатації.

Цього недоліку не мають зубчасті хони 3-го типу, які представляють собою зубчасте колесо з витонченими зубами та нанесеними на їх бокові поверхні абразивний шар товщиною 1,5...2,0 мм.

В зубчастих хонах 4-го типу зубчастий вінець можна розвернути відносно сталюї втулки. Абразивний вінець та сталю втулка з'єднані між собою за допомогою плоских ресор. Пружність абразивного вінця в окружному напрямку дозволяє значно знизити негативний вплив динамічних факторів на точність обробки та міцність зубчастого вінця зубчастого хону.

Такі зубчасті хони можна використовувати на верстатах з жорстким кінематичним зв'язком. За допомогою наклеєних на ресори датчиків можна слідкувати за ходом зняття припусків та виправленням похибок.

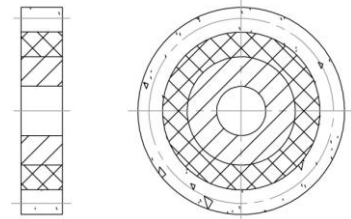
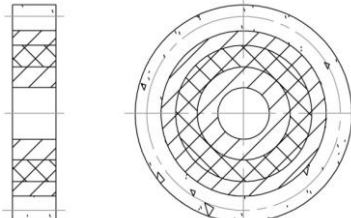
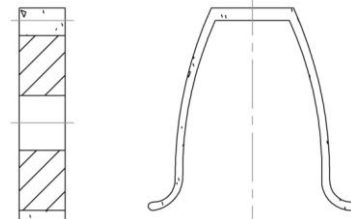
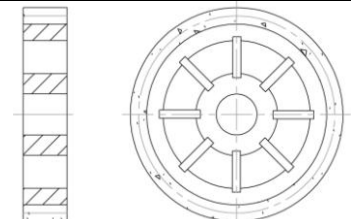
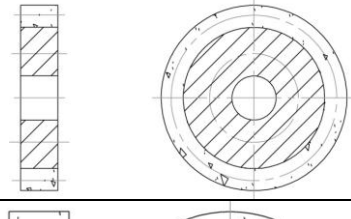
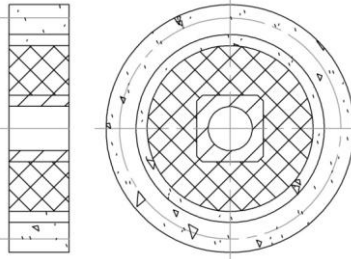
Зубчасті хони 5-го типу мають абразивний вінець з зубами внутрішнього зачеплення.

Хони 6-го типу відрізняються від відомих зубчастих хонів тим, що між зубчастим вінцем та металічною втулкою запресована пластмасова втулка, яка забезпечує часткову амортизацію радіальних та тангенціальних навантажень.

Значний вклад в широке впровадження алмазного зубохонінгування в промисловість внесли співробітник ІСМ АН УРСР. В цьому інституті розроблений ряд нових конструкцій зубчастих хонів та способи їх виготовлення, які знайшли широке промислове використання.

В таблиці 1.1 наведені форми та технічні характеристики зубчастих хонів.

Таблиця 1.1 – Форма та технічні характеристики зубчастих хонів [11]

Типи	Ескіз	Розміри зубчастих хонів, мм		
		Зовнішній діаметр	Діаметр отвору	Ширина вінця
1-й а 1-й б 1-й в		180 – 245 196 190	63,5 – 100 63,5 63,5	40 30 30
2-й		245	90	40
3-й		245	90, 100	40
4-й		245	90, 100	40
5-й		220	-	40
6-й		230	57	-

Алмазні зубчасті хони мають більш високу міцність зубчастого вінця. Процес обробки ними може здійснюватись при більш високих статичних



навантаженням, що сприяє підвищенню продуктивності, точність процесу та зносостійкості зубчастих хонів. По зносостійкості алмазні зубчасті хони перевершують більш ніж в 10 разів.

Процес зубохонінгування зубчастих коліс може здійснюватись методами повздожньої, тангенціальної та діагональної подачі. Необхідне робоче навантаження забезпечується шляхом радіального або окружного навантаження. В окремих конструкціях верстатів з цілю інтенсифікації процесу зубохонінгування деталі або інструменту задають осцилюючий осьовий або радіальний рух. Це доцільно у випадках хонінгування зубчастих коліс при малих кутах перехресування або при паралельних осях.

#### 1.2.4 Зубохонінгування дисковим хонем

Також існує схема зубохонінгування циліндричних зубчастих коліс дисковим хонем [12] (рис. 1.3), який приводиться в рух обертання приводом головного руху П. Цей процес можна виконувати двома способами: обробка в однопрофільному зачепленні хона 1 та колеса 2 (рис. 1.3 а) з постійною міжосьовою відстанню  $A$  та окружним навантаженням тормозним моментом  $M_T$  (5...15 Н·м), а також реверсним обертанням 1 хона та колеса (обертання 2) в цілях хонінгування обох сторін робочого профілю зубів; обробка при двопрофільному зачепленні хона 1 та колеса 2 (рис. 1.3 б) з радіальним навантаженням (рух 4) силою потребуючого значення (150...200Н) та реверсивним обертанням 1 хона та колеса (обертання 2) для забезпечення зняття рівномірного шару матеріалу з обох сторін робочого профілю зубів.

Крім перерахованих рухів, при зубохонінгуванні необхідно виконувати повздожнє зворотно-поступальне переміщення хона вздовж осі зубчастого колеса (рух 3), з повздожньою подачею  $S_p$ , яка дозволяє рівномірно знімати шар матеріалу по всій довжині зуба зубчастого колеса [12].

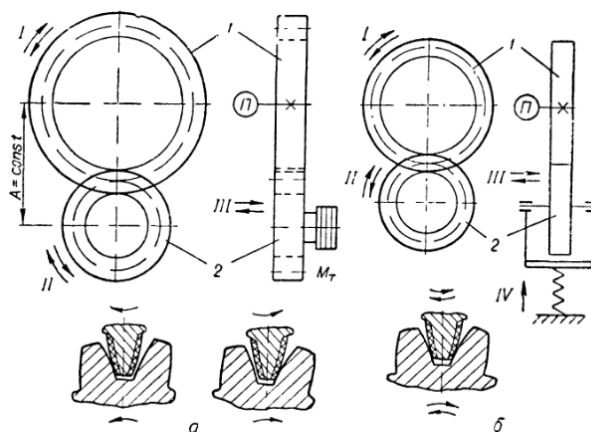


Рисунок 1.3 – Схеми зубохонінгування дисковим хонем [12]

Загалом процесу зубохонінгування зубчастими та дисковими хонами характерні такі недоліки: складність конструкції; складна технологія виготовлення зубчастого хону; відсутність гнучкості, оскільки кожен зубчастий хон проектується під конкретне зубчасте колесо; динамічні навантаження, що призводять до руйнування інструмента; неможливість обробки поверхонь западин і перехідних поверхонь западин [11].

### **1.3 Полірування зубчастих коліс**

Існує також такий метод, як полірування. Полірування являється заключною обробляючою операцією і виконується для покращення шорсткості робочих та перехідних (біля ніжки) поверхонь зубів зубчастих коліс майже всіх типів. Схематичне зображення процесу полірування зображено на рис. 1.4.

Поліруванням досягається шорсткість поверхні  $Ra = 0,16 \dots 0,04$  мкм. Дана операція може здійснюватись механічним, хімічним, електрохімічним, електрохіміко-механічним та іншими способами.

Механічний спосіб, може використовуватись для обробки термічно оброблених, так і для обробки термічно не оброблених зубчастих коліс.

Механічне полірування виконують за допомогою фетрових або повстяних кругів на зубошліфувальних верстатах, які працюють методом копіювання. В цьому випадку замість шліфувального круга використовують полірувальний круг. Кожна впадина між зубами зубчастого колеса оброблюється по черзі.

Робочий профіль полірувального круга в радіальному перерізі співпадає з профілем впадини між зубами зубчастого колеса. Перед початком обробки на його робочу поверхню наносять абразивний порошок або пасту з клеєвою зв'язкою. Крім того, замість нанесення абразиву на круг в зону різання можна підводити також абразивну суспензію. Для запобігання задирів та покращення якості полірування, різальну частину круга змащують маслами або жирами.

Робоча швидкість по повздовжня подача полірувальних кругів залежить від властивості оброблюючого матеріалу, типу круга та клеєвого зв'язку та знаходиться в межах: швидкість 18...35м/с, поперечна подача 2,5...8м/хв.

В якості полірувальних матеріалів використовують абразивні шліф порошки з зернистістю 8, 6...3, мікропорошки з зернистістю M14 та тонкі мікропорошки з зернистістю M10, M7, M5, а також пасти з електрокорунду і карбіду кремнія. Також слід зазначити, що велику розповсюдженість в техніці полірування отримала універсальна паста GOI.

Слід зазначити, що в дійсний час широко використовують алмазні пасти із мікропорошку АСМ та АМ зернистістю 28/20, 20/14, 14/10, 10/7 та пасти із кубічного нітриду бора зернистістю ЛМ14, ЛМ10, ЛМ7 та ЛМ5.

Також випускають полірувальні пасти на основі окису хрому (литі) по ГОСТ 8217 – 56. В їх складі, крім оксиду хрому, входять також стеарин, парафін та олеїнова кислота, яка інтенсифікує процес[12].

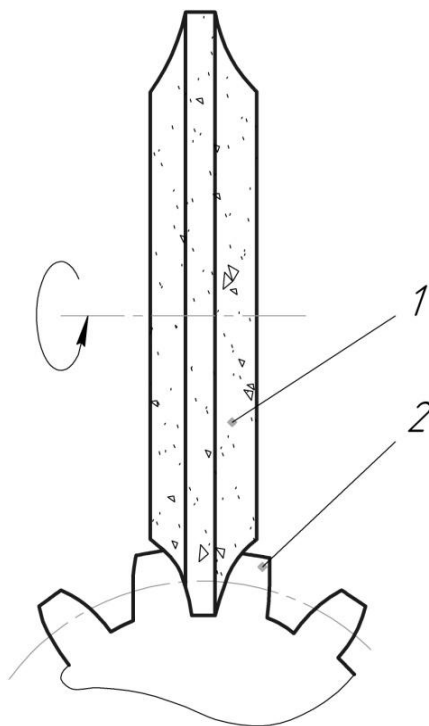


Рисунок 1.4 – Схематичне зображення процесу полірування зубчастих коліс  
1 – полірувальний круг; 2 – зубчасте колесо;

### 1.3.1 Хіміко- механічне полірування зубчастих коліс

Хіміко-механічне полірування поверхонь зубів зубчастого колеса, складає в собі процеси хімічного та механічного руйнування. В якості різального інструменту використовують головним чином абразивний дисковий круг. При хіміко-механічній обробці матеріал поверхневого шару вступає в хімічну реакцію з рідиною, яку вводять в зону обробки поверхнево-активними речовинами, яке утворює легко руйноване хімічне сполучення.

Абсорбуючись на поверхні зубчастого колеса, поверхнево активні речовини інтенсифікують розвиток слабких місць (дефектів), мікрощілей, тим самим полегшують наступну механічну обробку. Хіміко-механічне полірування зображено на рис. 1.5.

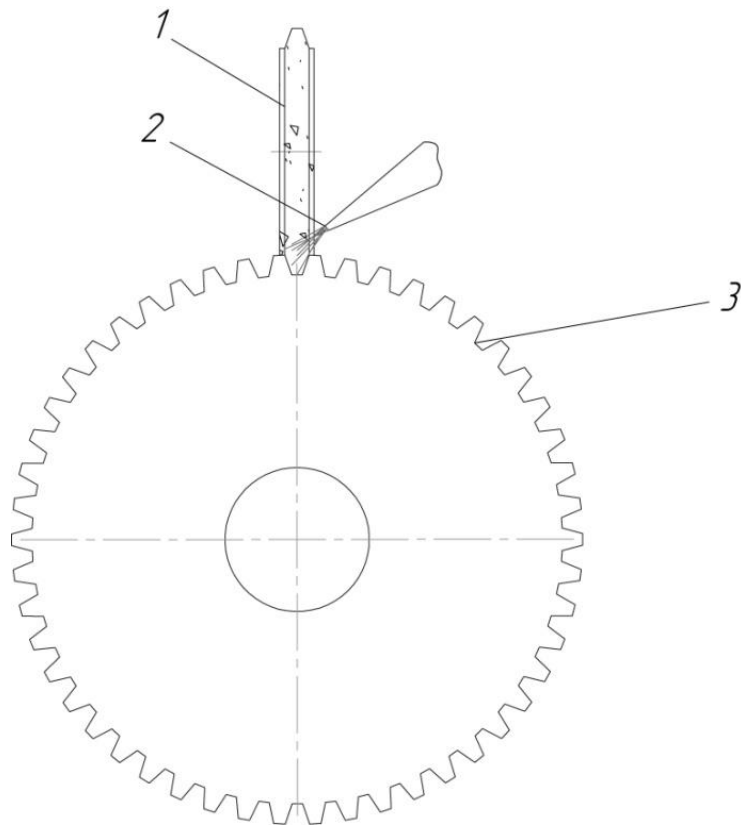


Рисунок 1.5 – Хіміко-механічне полірування  
1 – абразивний дисковий круг; 2 – хімічна рідина; 3 – зубчасте колесо;

### 1.3.2 Електрохімічне полірування зубчастих коліс

Електрохімічне полірування покращує чистоту шліфованих поверхонь зубчастих коліс приблизно на 1 клас, забезпечує деяке фланкування зубів, частково або повністю видаляє пошкоджений при попередній обробці поверхневий шар матеріалу. В результаті електрохімічного полірування збільшує втомну міцність цементованих або загартованих деталей.

Електрохімічне полірування здійснюється в спеціальних ваннах з електролітом, куди занурюють оброблююче зубчасте колесо, яке підключають до позитивного полюсу джерела струму і зубчасте колесо буде виступати в якості анода. В якості катода використовують металічний каркас. При проходженні струму через отриманий ланцюг здійснюється розчинення оброблюємої поверхні зубчастого колеса (деталі) та видаляються вершини мікронерівностей та здійснюється вирівнювання поверхонь. Електрохімічне полірування зображене на рис.1.6.

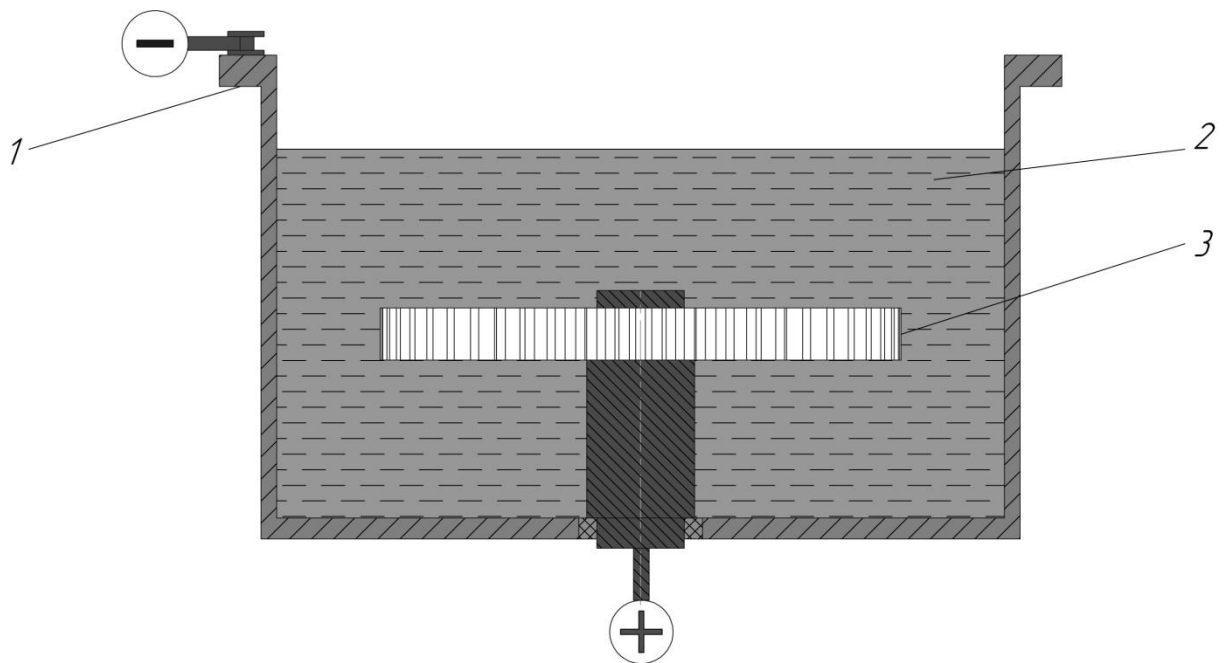


Рисунок 1.6 – Електрохімічне полірування  
1 – Корпус (катод); 2 – електроліт; 3 – Зубчасте колесо (анод);

#### 1.4 Гідроабразивна обробка зубчастих коліс

Гідроабразивна обробка зубів зубчастих коліс здійснюється струменем рідини, яка направлена на поверхню деталі, яка містить у підвищеному стані абразивні зерна. Абразивні зерна вдаряються об поверхню зубів, знімають поверхневий шар металу та удаляють сліди попередньої обробки, покращують мікрогеометрію поверхні, а також забезпечують наклеп поверхневого шару матеріалу.

У якості рідини використовують 5% емульсію з додаванням нітриду натрія та тринатрійфосфата для придання поверхні блиску, а в якості матеріалу абразивних зерен виступає карбід кремнію для попередньої обробки або електрокорунд для остаточної обробки. Концентрація абразивних елементів у рідині вибирається в межах  $1/3 \dots 1/6$ . Для забезпечення обробки всіх зубів зубчастого колеса надягаються на спеціальні обертові оправки. Установки для гідроабразивної обробки зубів зубчастих коліс досить складні за конструкцією, а також досить швидко зношуються деталі робочих органів установки в абразивному середовищі.

Більш простим гідро абразивним способом обробки являється спосіб обертання зубчастого колеса в ванні, яка наповнена сумішчю абразивного порошку з рідиною.

Гідроабразивна обробка не усуває похибки мікрорельєфу, а геометрична точність деталі від гідро абразиву може навіть знижуватись. Тому гідро абразивну обробку використовують для загартованих зубчастих коліс

середньої та низької точності. Гідроабразивна обробка зубчастих коліс зображена на рис.1.7.

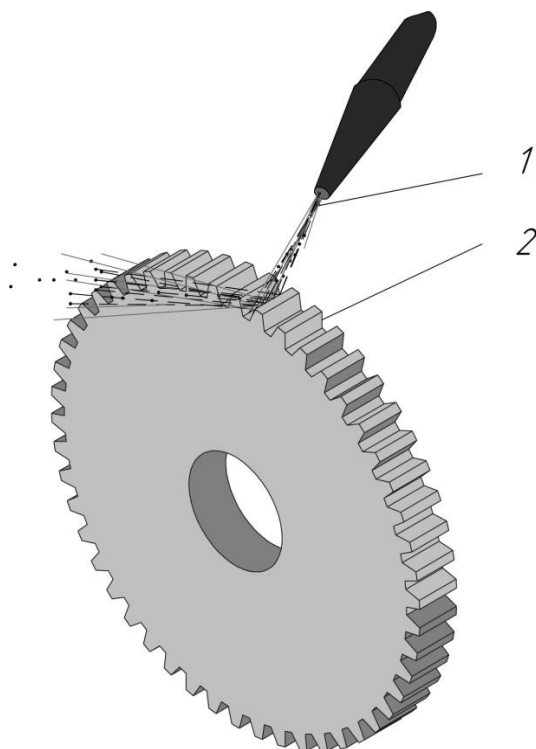


Рисунок 1.7 – гідро абразивна обробка  
1 – Гідроабразив; 2 – Зубчасте колесо;

### 1.5 Дробоструменева обробка зубчастих коліс

За допомогою пневмодробоструменевих і дробометних процесів зміцнюють, а також очищують деталі практично будь-якої геометричної форми, і при цьому не потрібна їх строга орієнтація у просторі. Введення в дробоударне зміцнення мастильно-охолоджуючих рідин і розробка методів гідродрібоударного (ГДУ) зміцнення дозволяє зробити процес більш тонко регульованим і стабільним. Дробоструменеве зміцнення легко піддається автоматизації [51].

З найбільш типових дробометних пристроїв, що використовують у промисловості, відомий пристрій моделі ДУ-1 і його модифікації. В основу пристрою ДУ-1 покладений механічний принцип розкидання дробу швидкообертним потоком з вертикальним розміщенням осі його обертання. Подача дробу і очищення його від уламків автоматизовані. Пристрій складається з трьох головних частин: робочої камери, сепаратора і елеватора. Дріб засипається в завантажувальний бункер елеватора, потім піднімається елеватором у бункер живильного пристрою ротора, з якого він попадає через

дросель на лопатки ротора, котрі надають дробу швидкість до 70 м/с. Деталі, які поміщуються у струмінь дробу, зміцнюються. Відпрацьований дріб падає в нижній збірник елеватора. В процесі вільного падіння дріб зустрічається з струменем повітря, уламки дробу малої маси зносить у бункер відходів. Цей пристрій використовується для зміцнення наклепом багатьох деталей, окрім зубчастих коліс ним оброблюють також спіральні пружини, напівосі заднього мосту тролейбусів, прошивочних пуансонів гарячого штампування тощо[51].

На практиці застосовують дріб діаметром 0,4...2,0 мм. Чим менше діаметр дробу, тим нижча шорсткість обробленої поверхні.

Зміцнення і очистка крупних і важких деталей в умовах важкого машинобудування виконується в дробоструменевих камерах форсункою, якою керує одягнений у відповідний автономний скафандр оператор або спеціальний робот. Отже для зміцнення необхідний кулястий та міцний дріб. Щоб не було деформування дробу в момент удару, твердість його повинна бути вища твердості оброблюваного матеріалу. Але при великому підвищенні твердості дробу підвищується його крихкість, що призводить до розколу дробу, пошкодження зміцнюваної поверхні та знижує ефективність процесу[51].

Методи обробки матеріалів поділяють на дві групи — обробка сухим дробом та обробка дробом із мастильно-охолоджуючою рідиною (МОР). При сухій дробоударній обробці, коли удари дробу слідує один за одним з великою частотою, перші удари відчищають поверхню не тільки від окалини чи окисної плівки, але й від чужорідних молекулярних часток, роблячи її ювенільною. Цей процес проходить в умовах сухого тертя.

Недоліками дробометного зміцнення [51] є нагрів деформованої поверхні через удари твердих дробинок, які летять з великою швидкістю, невисока щільність і рівномірність потоку дробу, що відображається на однорідності і суцільності зміцнення. Також недоліками зміцнення сухим дробом є жорсткий удар дробинок по деталі при великих швидкостях польоту викликає високі локальні температури, наприклад, при зміцненні сталі миттєва температура сягає 650°C і більше. Дробоструменева обробка зображена на рис.1.8.

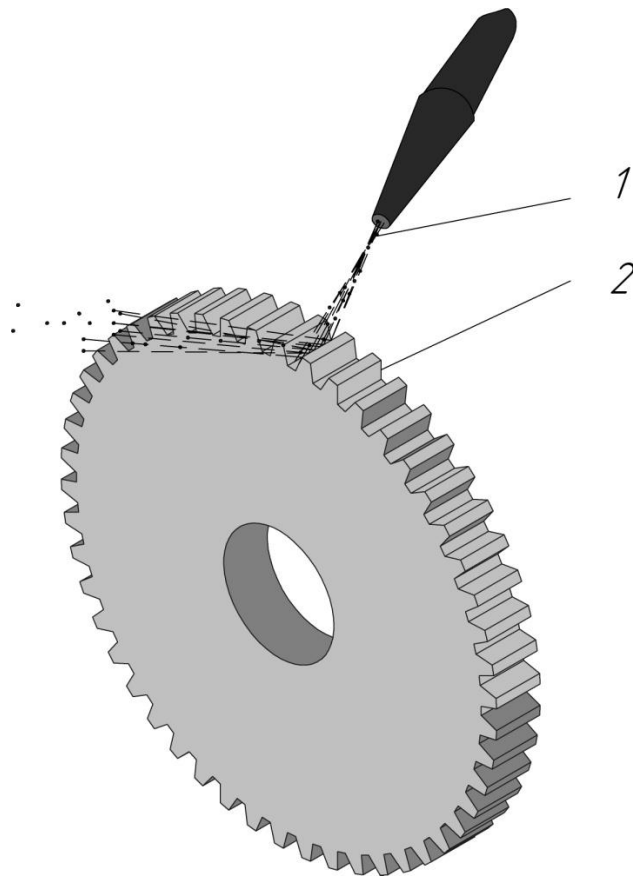


Рисунок 1.8 – Дробоструменева обробка зубчастих коліс  
1 – Дріб; 2 – Зубчасте колесо;

### 1.6 Віброабразивна обробка зубчастих коліс

Вібраційна обробка залежно від характеру робочого середовища є механічним або хіміко-механічним процесом знімання найдрібніших частинок металу і його оксидів з оброблюваної поверхні, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичної деформації частинками робочого середовища, що здійснюють в процесі роботи коливальний рух. Процес супроводжується послідовним нанесенням на поверхню оброблюваних деталей великого числа мікроударів частинками робочого середовища при їх взаємному зіткненні і ковзанні. Удари викликані дією направлених вібрацій, що надаються робочій камері, в якій розміщені оброблювані деталі і робоче середовище. Якщо робочому органу установки надаються вібраційні переміщення у двох (трьох) напрямках то такий тип механічної обробки називається просторовою віброабразивною обробкою. Такий тип обробки є більш енергоємним процесом, але, водночас, і більш ефективним та менш тривалим, у порівнянні із процесом обробки при накладанні одностороннього вібраційного навантаження. Це пояснюється



тим, що чим складніший рух виконує робоча камера з абразивним матеріалом, тим більша величина кінетичної обробки передається середовищу та зануреним у неї оброблюваним деталям, що і призводить до інтенсифікації процесу обробки.

Існує декілька технологічних схем виконання процесу вібраційної обробки: обробка в суху або з циркуляцією розчину; обробка вільно завантажених деталей, порівняно невеликих розмірів з періодичним або безперервним завантаженням і розвантаженням їх; обробка важких і великогабаритних деталей, закріплених в спеціальних пристосуваннях, процес віброабразивної обробки зображено на рис.1.9. Технологічні можливості вібраційної обробки достатньо широкі і визначаються особливостями взаємодії робочого середовища з поверхнею оброблюваних деталей, режимами обробки, характеристикою робочого середовища. Поєднання таких елементів процесу, як послідовне нанесення безлічі мікроударів, інтенсивне перемішування робочого середовища і оброблюваних деталей при різній їх взаємній орієнтації, супроводжувані залежно від характеристики і складу робочого середовища і режимів вібрації, зніманням металу, його оксидів і поверхневою пластичною деформацією створює умови для виконання операцій: очищення литих заготовок; видалення облоя на заготовках з металів, пластмас і гуми; очищення деталей і заготовок від окалини і корозії; шліфування і полірування поверхні; видалення задирок; скруглення і полірування гострих кромek; поверхневого наклепу, миття і сушки деталей, очищення деталей від нагару, накипу і щільно прилеглого ґрунту при ремонті і ін. Конструкція устаткування для вібраційної обробки дозволяє розміщувати і застосовувати різні тверді, рідкі і змішані склади робочих середовищ. Це створює умови як для протікання процесів механічної обробки (мікрорізання і пластична деформація), так і фізико-хімічних процесів (хімічних реакцій, дифузії, адгезії, адсорбції) і їх поєднання шляхом введення до складу робочого середовища відповідних порошкоподібних матеріалів, розчинів, суспензій, електrolітів.

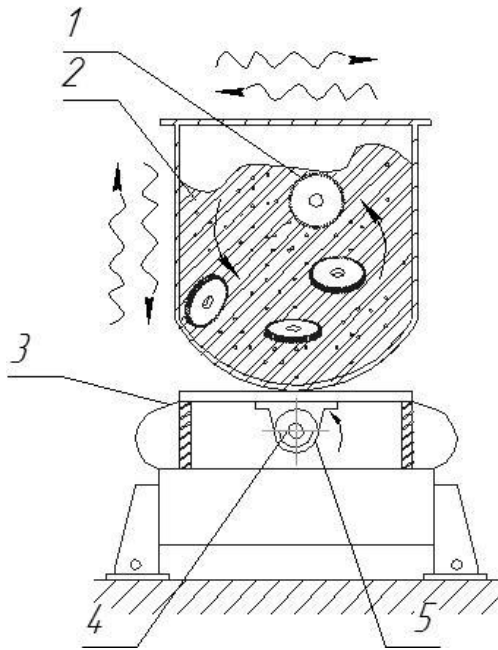


Рисунок 1.9 – Віброабразивна обробка зубчастих коліс  
 1 – Оброблюємі зубчасті колеса; 2 – абразивний робочий розчин;  
 3 – пружини; 4 – вал; 5 – незбалансований вантаж;

### 1.7 Магнітно-абразивна обробка зубчастих коліс за допомогою експериментальної роторної установки

Гаврушкевич Андрій Юрійович запропонував сучасний метод оброблювання зубчастих коліс за допомогою магнітно-абразивної обробки. Метод полягає в тому, що зубчасте колесо знаходиться в магнітному полі і здійснюється обробка за допомогою вільного абразиву (рис.1.10).

Кінематика магнітно-абразивної обробки зубчастих коліс між протилежно розташованими полюсами наступна.

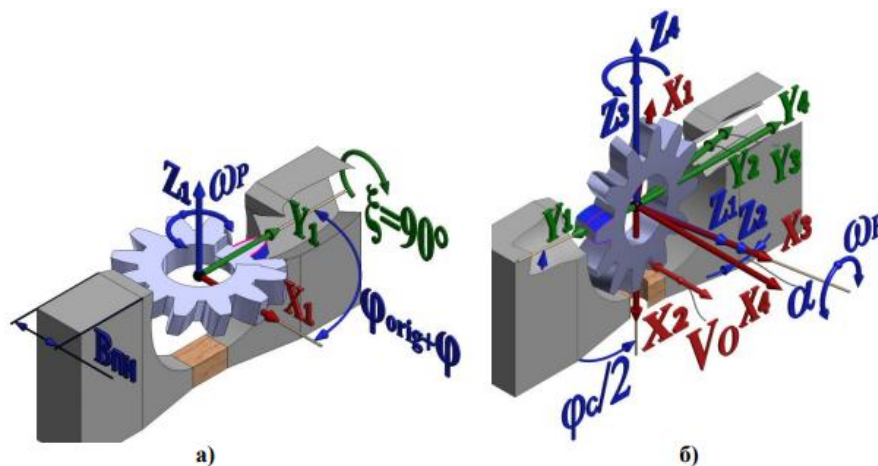


Рисунок 1.10 – Схема установки зубчастого колеса в робоче положення в магнітній системі та системи координат [3]

а)положення колеса в робочій зоні; б)колесо в робочому положенні

Недоліком даного методу являється те, що дана магнітна система розрахована на певні габарити зубчастого колеса і тим самим втрачає свою універсальність, також така система потребує спеціалізованого обладнання та збільшення збільшення економічних затрат.

### 1.8 Показники якості зубчастих передач

Показники якості зубчастих передач можна поділити на такі категорії [4, 5, 6, 7, 9, 10]:

- показники геометричної точності (кінематичної точності, плавності роботи, повноти контактів зубів, бічного зазору);
- показники, що забезпечують довговічність зубчастих передач (міцність та витривалість при згині, контактні міцність та витривалість, тощо);
- акустична активність (рівень шуму).

Вимоги до робочих поверхонь зубчастих коліс у більшості галузей машинобудування за точністю і шорсткістю представлені у табл. 1.2 [8].

Таблиця 1.2 – Точність циліндричних зубчастих коліс і шорсткість бічних поверхонь зубів [8]

Зубчасті колеса	Степінь точності за ГОСТ 1643-81	Шорсткість поверхні по Ra, мкм (ГОСТ 25142-82)
Вимірювальні	3...4	0,1...0,8
Редукторів газових і парових турбін	3...5	0,3...1,2
Авіаційних двигунів	3...5	0,3...1,2
Металорізальних верстатів	3...6	0,3...2,0
Залізничних електро- і тепловозів	4...6	0,6...2,0
Легкових автомобілів	5...6	0,8...2,0
Пасажирських автобусів	5...7	0,8...2,5
Вантажних автомобілів	5...8	0,8...3,2
Мотоциклів	5...7	0,8...2,5
Тракторів	6...8	1,0...3,2
Суднових двигунів	4...6	0,6...2,0
Вітряних електроустановок	5...6	0,6...2,0

Продовження Таблиці 1.2 – Точність циліндричних зубчастих коліс і шорсткість бічних поверхонь зубів

Зубчасті колеса	Степінь точності за ГОСТ 1643-81	Шорсткість поверхні по Ra, мкм (ГОСТ 25142-82)
Редукторів загального призначення	5...7	0,8...2,5

### Висновки:

Сучасні методи фінішної обробно-зміцнювальної обробки діляться на шість класів [15, 32]. Більшість із відомих методів поверхневого пластичного деформування [17, 31] неможливо застосувати для обробки робочих поверхонь та впадини зубчастих коліс з модулями  $m \leq 10$  мм в силу використовуваних робочих органів та інструментів. Для фінішної обробки зубчастих коліс застосовуються в основному такі методи ППД [31]: обкочування роликами, кульками або зубчастими валками, алмазне вигладжування, дробоструменева, вібраційна [30,33], гідроабразивна або відцентрово-ротаційна обробка, вібраційно-відцентрова обробка [16, 19, 18], дорнування, обробка обертовими щітками (крацювання) та інші [31, 34, 35, 39] або інструментами у вигляді черв'ячних шеверів, на робочих поверхнях яких розташований дротяний ворс [39,40,41], тягове шліфування [33, 49, 50]. Розробляються нові способи, наприклад, потоком абразиву з накладенням ультразвуку [45], термоімпульсним методом [25-29, 47, 48]. Докладний аналіз переваг і недоліків зазначених методів, а також електрохімічних і електрофізичних методів обробки [20, 21, 28, 46], методів обробки вільними абразивами [22, 23, 24, 35,36, 37, 38, 42, 43, 44], при обробці складно-профільних деталей, до яких відносяться і зубчасті колеса, виконано в роботі [14].

Недоліки існуючих технологій виготовлення зубчастих коліс, і особливо фінішних операцій, призводять до виходу із ладу передач з різних причин. ГОСТ 31381-2009 [11] класифікує пошкодження на 7 класів: зношування, заїдання, залишкова деформація, контактна втома, тріщини, руйнування зуба.

Для попередження виникнення та розвитку зазначених класів пошкоджень ГОСТ 31381-2009 та [3] рекомендують: підвищення чистоти обробки робочих поверхонь зубів, формування мікрорельєфу для попередження видавлювання мастила; підвищення поверхневої твердості; формування залишкових напружень стискання; зменшення контактних напружень; забезпечення наявності фасок або округлень для попередження

тріщин по межі зміцненого шару та усунення можливих концентраторів напружень в западині зуба [3].

Існує велика кількість методів фінішної обробки зубів зубчастих циліндричних коліс. Деякі з них назавжди були витіснені з виробництва більш новими та сучасними. Не дивлячись на досягнення у розвитку методів і інструментів фінішної обробки зубів зубчастих коліс, результати обробки все ж таки мають свої недоліки при використанні будь-якого з них. Такими недоліками частіше всього становляться: похибка профілю отриманого після обробки зуба зубчастого колеса, швидке зношування оброблюючого інструмента, висока вартість інструмента, невисока швидкість обробки.

Традиційні технологічні операції фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс шляхом зубохонінгування й обкатування часто не відповідають сучасним вимогам по цілому ряду показників. Основною функцією зубохонінгування є зняття дефектного шару й забезпечення необхідних параметрів шорсткості після термообробки або зубошліфування при тій же практично точності.

Виходячи з цих всіх показників, пропонується створити кардинально новий інструмент для фінішної обробки циліндричних зубчастих коліс, який буде мати ряд переваг над вже існуючими інструментами, а також буде більш універсальним ніж інші розповсюджені інструменти.

## **РОЗДІЛ 2. ФОРМОУТВОРЕННЯ ДИСКОВИМ ІНСТРУМЕНТОМ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

### **2.1 Загальні положення формоутворення дисковим інструментом**

Інструмент для магнітно-абразивного оброблення зубчастих коліс, здійснює таку ж саму кінематику рухів, як і черв'ячні фрези, тому згідно основних положень теорії формоутворення поверхонь, обробка поверхні зубчастих коліс черв'ячними фрезами відноситься до схем третього класу, яка зводиться до кочення з ковзанням гіперболоїда по гіперболоїду. Вихідна інструментальна поверхня таких фрез визначається за другим способом утворення вихідних інструментальних поверхонь [59-61, 62, 63,]. Де твірна допоміжна поверхня  $T$  є зуборізна інструментальна рейка спряжена з зубчастим колесом. В такому випадку робоча бічна поверхня вихідної інструментальної поверхні фрези – евольвентна гвинтова поверхня, це питання досить детально досліджено і описано в існуючих джерелах літератури з цього питання [59-61, 62, 63].

Проте при виготовленні зубчастих коліс вирішується не пряма задача знаходженні ВІП, а обернена при чому профіль зуборізної рейки є твірна архімедової чи конволюотної гвинтової поверхні, яка і є вихідною інструментальною поверхнею проектуючої фрези. Тому основне питання проектування фрез є знаходження геометричних параметрів профілю зуба колеса, що утворені вихідною інструментальною поверхнею не евольвентною гвинтовою поверхнею рейки фрези.

Існуюча теорія формоутворення поверхні зубчастих коліс при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами ґрунтується на багатьох припущеннях. Одним із таких є те, що процес формоутворення при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами представляється, як процес формоутворення плоскою рейкою, що зводить цю задачу до вирішення у площині, це не зовсім вірно і при подальшому розгляді її стосовно

використання МАО необхідно розглянути задачу у просторі для того, щоб можна було визначити зазори між поверхнею зубчастого колеса та інструмента в процесі обробки.

Для вирішення цього необхідно розглянути узагальнену схему формоутворення циліндричних зубчастих коліс при зубофрезеруванні черв'ячними фрезами, що була запропонована в [66] і трансформувати її до задачі обробки дисковим інструментом при кінематичній схемі формоутворення 3 класу [67, 68].

## 2.2 Узагальнена схема формоутворення циліндричних зубчастих коліс при обробці інструментом у формі диску

Розглянемо схему формоутворення поверхні циліндричних зубчастих коліс вихідною інструментальною поверхнею дисковим інструментом рис.2.1 [57, 58, 66, 67, 68].

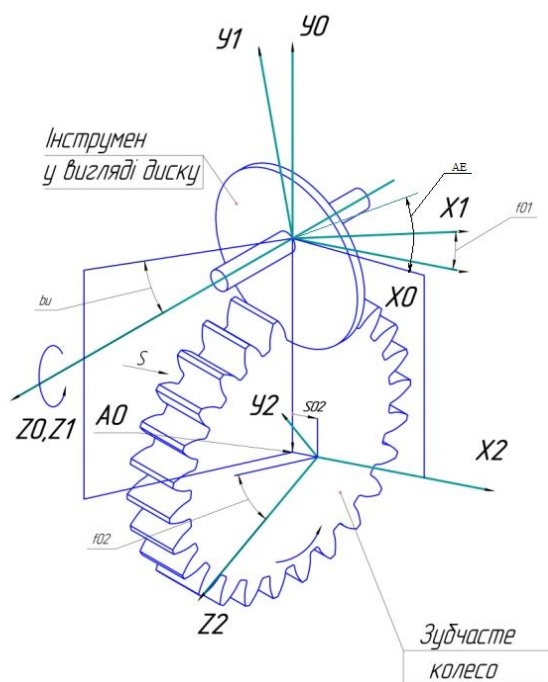


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема формоутворення циліндричних зубчастих коліс дисковим інструментом

Розглянемо 3 системи координат:

-  $S_0(X_0Y_0Z_0)$  – нерухома система координат пов'язана з зубофрезерними верстатом, вісь  $Z_0$  співпадає з віссю шпинделя верстата;

-  $S_1(X_1Y_1Z_1)$  – рухома система координат пов'язана з дисковим інструментом, вісь  $Z_1$  співпадає з віссю дискового інструменту, система обертається навколо осі  $Z_0$  і рухається поступально уздовж осі  $X_2$ ;

-  $S_2(X_2Y_2Z_2)$  – рухома система координат пов'язана з зубчастим колесом, що обробляється, вісь  $X_2$  співпадає з віссю зубчастого колеса, система обертається навколо осі  $X_2$ ;

Розглянувши дану схему формоутворення отримуємо, що в системі присутні два незалежні між собою рухи, це сумісне обертання дискового інструменту і зубчастого колеса навколо свої осей – рух обкату, та гвинтовий рух дискового інструменту відносно осі колеса, що приводить до утворення руху подачі для косозубих коліс. При вираженні гвинтового руху дискового інструменту відносно осі колеса в прямолінійний, це відповідає формоутворенню прямозубих зубчастих коліс.

Рух обкату будемо позначати через коефіцієнт  $f$ , рух подачі будемо позначати через коефіцієнт  $s$ .

Позначимо наступні параметри руху в системі: для руху обкату  $f_{01}$  – обертання дискового інструмента навколо своєї осі,  $s_{02}$

Зв'язок між параметрами руху буде наступним:

$$i_{12} = \frac{f_{01}}{f_{02}} = \frac{1}{Z_k} \quad (2.1)$$

Де:  $i_{12}$  - передаточне відношення при русі обкату, 1 – кількість заходів дискового інструмента,  $Z_k$  – число зубів колеса, що обробляється.

Зв'язок між системами координат запишемо в матрично-структурному вигляді наступним чином:



$$R_2 = m_{20s} \cdot m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} \cdot R_1 \quad (2.2)$$

Де:  $R_1$ ,  $R_2$  – радіус вектор точки в системі пов'язаною з дисковим інструментом та зубчастим колесом відповідно  $m_{01}$ ,  $m_{02}$ ,  $m_{20f}$ ,  $m_{20s}$  - матриці перетворень координатних систем і з врахуванням формули (2.1) вони запишуться наступним чином:

$$\begin{aligned} m_{01} &= \begin{pmatrix} \cos f_{01} & -\sin f_{01} & 0 & 0 \\ \sin f_{01} & \cos f_{01} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; & m_{20} &= \begin{pmatrix} \cos b_u & 0 & \sin b_u & 0 \\ 0 & 1 & 0 & A_0 \\ -\sin b_u & 0 & \cos b_u & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \\ m_{20f} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(i_{12}f_{01}) & -\sin(i_{12}f_{01}) & 0 \\ 0 & \sin(i_{12}f_{01}) & \cos(i_{12}f_{01}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; & m_{20s} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & s_{02} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Де  $b_u$  – кут розвороту дискового інструмента відносно осі зубчастого колеса, в нашому випадку він буде дорівнювати 0,  $A_0$  – відстань між осями обертання дискового інструмента та колеса  $m_{01}$  – матриця повороту дискового інструмента,  $m_{20}$  - матриця розвороту дискового інструмента і встановлення міжосьової відстані,  $m_{20f}$  – матриця повороту зубчастого колеса,  $m_{20s}$  – матриця руху дискового інструмента вздовж осі колеса,  $s_{02}$ , це параметр переміщення фрези уздовж осі колеса. Це визвано тим, що при нобробці прямозубих зубчастих коліс параметр  $p_k$  приймається рівним нескінченності і в матриця  $m_{20s}$  є невизначеність яку розкриваючи буде мати вигляд матриці  $m_{20s}$ .

Кут розвороту дискового інструменту  $b_u$  розраховується за залежністю:

$$b_u = 0 \quad (2.4)$$

Додатні значення установочних параметрів в залежностях (2.2), (2.3), (2.4) приведені для випадку нарізання лівими фрезами лівих зубчастих коліс, у випадку нарізання правими фрезами, або правих зубчастих коліс необхідно значення  $b_f$ ,  $b_u$  підставляти з від'ємними значеннями.

Для запису рівняння контакту поверхні фрези і колеса, визначення геометрії різальної частини інструменту, завантаження різальної частини черв'ячних фрез необхідно визначити вектор швидкості руху обкату і подачі при зубофрезеруванні [57, 58, 66, 67, 68].

### **2.3 Модель дискового інструменту**

Вихідна інструментальна поверхня дискового інструменту складається з декількох ділянок це бічна сторона, вершина і округлення при вершині, які приймають участь у формоутворенні поверхні зубчастого колеса. Тому необхідно записати рівняння вихідної інструментальної поверхні дискового інструменту, як загальний випадок утворення вихідної інструментальної поверхні черв'ячних фрез, така гвинтова поверхня утворюється ексцентричною віссю дискового інструмента.

Запишемо рівняння вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента, як загального випадку утворення вихідної інструментальної поверхні черв'ячних фрез. Вихідна інструментальна поверхня дискового інструмента утворюється рухом по гвинтовій траєкторії твірного профілю (рис.2.2 а). Для випадку, що розглядається профіль вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента складається з 5 ділянок: 2 бічні сторони, вершина, 2 заокруглення при вершині. Профіль бічних сторін та вершини представляє прямі а заокруглення що з'єднують бічні сторони з вершинною ділянкою є дуги кіл (рис.2.2 б) [58].

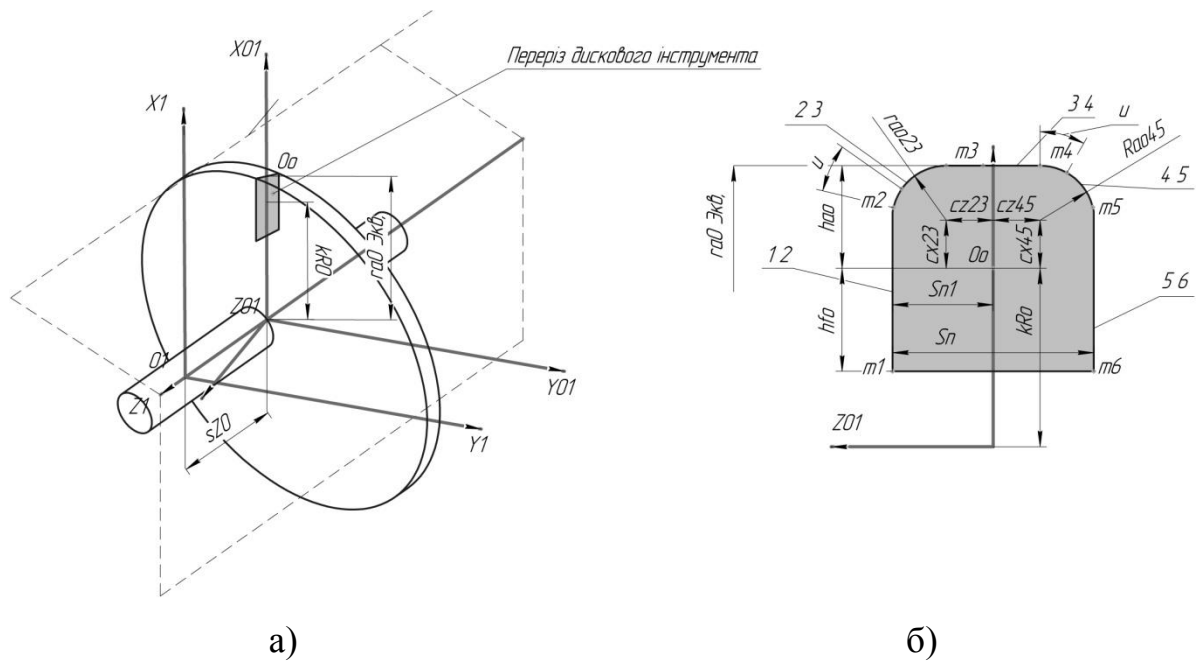


Рисунок 2.2 - Схема утворення вихідної інструментальної поверхні загального випадку – дискового інструмента

- а) утворення гвинтової поверхні рухом по гвинтовій траєкторії профілю,
- б) опис профілю дискового інструмента, що складається з декількох ділянок сполучених між собою.

Дискова поверхня утворена твірною, що рухається по гвинтовій траєкторії, яка лежить в площині  $\Sigma(X_{01}, Z_{01})$  (рис.2.2.а) і описується рівнянням  $R_{01}i(X_{01}, 0, Z_{01})$  запишеться у наступному вигляді:

$$R_1 i = m_3 R_{01} i;$$

$$m_3 = \begin{pmatrix} \cos t & -\sin t & 0 & 0 \\ \sin t & \cos t & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (2.5)$$

Де  $m_3$ -матриця, що описує обертовий рух твірного профілю уздовж осі  $Z_1$ .

Тоді рівняння твірної, яке складається з прямих ліній та дуг кіл, як найбільш розповсюджених запишеться в наступному вигляді:

$$R_{01LINE} = \begin{pmatrix} kx_i u + X_i \\ 0 \\ kz_i u + Z_i \\ 1 \end{pmatrix}; \quad \begin{matrix} kx_i = X_{i+1} - X_i \\ kz_i = Z_{i+1} - Z_i \end{matrix};$$

$$R_{01CIRCLE} = \begin{pmatrix} cx_i + r_{a0i} \sin(aS_i + Ka_i u) \\ 0 \\ cz_i + r_{a0i} \cos(aS_i + Ka_i u) \\ 1 \end{pmatrix}; \quad (2.6)$$

Де  $R_{01LINE}$ - твірна прямолінійної ділянки,  $R_{01CIRCLE}$ - твірна округлої ділянки,  $X_i, Z_i, X_{i+1}, Z_{i+1}$  – координати граничних точок прямолінійної твірної ділянки профілю вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента,  $r_{a0}$  – радіус округлення вершини профілю дискового інструмента,  $cx_i, cz_i$  – центри координат дуг округлень вершини профілю вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента (рис.2.2.б),  $aS_i$  – к-нт, що відповідає початковому значенню секторного кута дуги округлення вершини на робочій ділянці,  $Ka_i$  – к-нт пропорційній значенню куту сектора, що описує робочу ділянку округлення вершини профілю вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента.

Вихідна інструментальна поверхня дискового інструмента є циліндричною поверхнею з ексцентричною віссю, вона представляє собою комбінацію сполучення прямих ділянок і дуг кіл, які плавно спряжені між собою. Такий твірний профіль (рис.2.3) складається з 5 ділянок позначених, як 12, 23, 34, 45, 56. З них ділянка 12, 56 – бічні робочі поверхні вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента, ділянка 34 – ділянка вершинної поверхні інструмента, ділянки 23, 45 – заокруглення при вершині дискового інструмента радіусом  $r_{a0}$ , що з'єднують бічні сторони і вершинну ділянку.

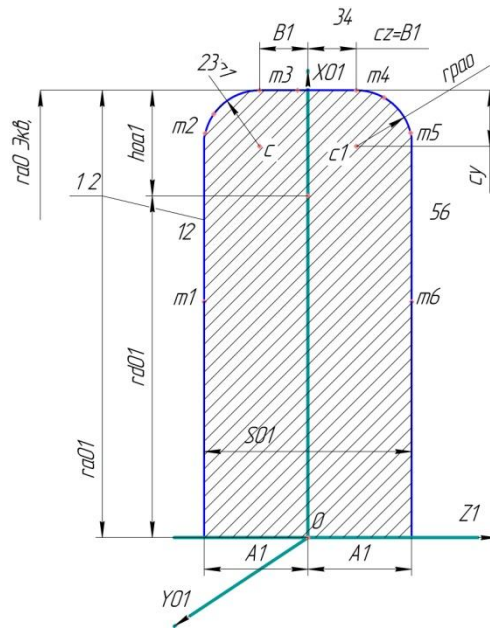


Рисунок 2.3 – Твірний профіль вихідної інструментальної поверхні  
дискового інструмента

Тоді рівняння кожної ділянки ВПІ дискового інструмента запишеться наступним чином:

$$R1_{12} = \{ \cos(t)(kx12 u + X1), AE + \sin(t)(kx12 u + X1), AS + B1, 1 \}$$

$$R1_{23} = \{ \cos[t](cx23 + R23 \sin[fs23 + fd23 u]), AE + \sin[t](cx23 + R23 \sin[fs23 + fd23 u]), AS + cz23 + R23 \cos[fs23 + fd23 u], 1 \}$$

$$R1_{34} = \{ Ra \cos[t], AE + Ra \sin[t], AS + kz34 u + Z3, 1 \}$$

(2.7)

$$R1_{45} = \{ \cos[t](cx45 + R45 \sin[fs45 + fd45 u]), AE + \sin[t](cx45 + R45 \sin[fs45 + fd45 u]), AS + cz45 + R45 \cos[fs45 + fd45 u], 1 \}$$

$$R1_{56} = \{ (kx56 u + X5) \cos[t], AE + (kx56 u + X5) \sin[t], AS + B2, 1 \}$$

Де  $Ra$ – радіус вершини дискового інструмента,  $Ra_{23}$ ,  $Ra_{45}$ – радіус округлень вершини дискового інструмента,  $u$  – змінний параметр ,що відповідає за положення точки на прямолінійній твірній профілю,  $AE$ -

ексцентриситет дискового інструменту,  $AS$ - зміщення інструменту відносно міжосьового перпендикуляру.

Де  $S_{0I}=2AI$  – товщина дискового інструмента.

Для опису робочих ділянок профілю ВІП фрези параметри  $t$  і  $u$  повинні змінюватись в наступних межах:  $t[0, 2\pi]$ ,  $u[0,1]$

## **2.4 Визначення спряженої поверхні зубчастих коліс при їх формоутворенні поверхнею дисковим інструментом**

Визначати спряжену поверхню зубчастого колеса з поверхнею вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента будемо, як огинаючу поверхню при русі дискового інструмента відносно зубчастого колеса. Так, як в системі присутні два незалежні одне від одного рухи то при визначенні поверхні спряженого зубчастого колеса з вихідною інструментальною поверхнею дискового інструмента необхідно розглянути сумісно два рівняння контакту, відповідно для кожної ділянки вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента:

$$R2_i(t, u, f_{01}, s_{02}), NV_f i = 0, NV_s i = 0 \quad (2.8)$$

Де  $R2_i$  – рівняння сімейства поверхонь вихідної інструментальної поверхні дискового інструмента в системі пов'язаній з зубчастим колесом,  $NV_{fi}$ , - рівняння контакту при русі обкату від зміни значень параметру  $f_{01}$ ,  $NV_{si}$ , – рівняння контакту при русі дискового інструмента уздовж осі колеса від зміни значень параметру  $s_{02}$ .

Рівняння контакту згідно [52, 53, 54, 55, 56, 64, 65] запишуться в наступному вигляді:

$$\begin{aligned}
NV_{fi} = & \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}{\frac{\partial t}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}{\frac{\partial t}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}{\frac{\partial t}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}} \\ \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}{\frac{\partial u}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}{\frac{\partial u}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}{\frac{\partial u}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}} \\ \frac{\partial f_{01}}{\partial f_{01}} & \frac{\partial f_{01}}{\partial f_{01}} & \frac{\partial f_{01}}{\partial f_{01}} \end{array} \right| = 0 \\
NV_{si} = & \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}{\frac{\partial t}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}{\frac{\partial t}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}{\frac{\partial t}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}} \\ \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}{\frac{\partial u}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Xi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}{\frac{\partial u}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Yi}(t, u))}} & \frac{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}{\frac{\partial u}{\partial(m_{20f} \cdot m_{20} \cdot m_{01} R1_{Zi}(t, u))}} \\ \frac{\partial s_{02}}{\partial s_{02}} & \frac{\partial s_{02}}{\partial s_{02}} & \frac{\partial s_{02}}{\partial s_{02}} \end{array} \right| = 0
\end{aligned} \tag{2.9}$$

В розгорнутому вигляді використовуючи (2,1 – 2,9) рівняння контакту запишуться наступним чином:

- прямолінійні ділянки 12 та 56 рівняння контакту не має розв'язку так як, ці ділянки не формують кінцевий профіль зубчастого колеса;
- округлі ділянки 23, 45

#### Ділянка 23:

$$\begin{aligned}
NVf = & -(1/2) fd23 R23 (cx23 + R23 \sin(fd23 u + fs23)) (2 A0i12 \cos(fd23 u + \\
& + fs23) + AEi12 \cos(f1 + fd23 u + fs23) + AEi12 \cos(f1 - fd23 u - fs23) - \\
& - AE \sin(fd23 u + fs23 - t) - AE \sin(fd23 u + fs23 + t) - i12 (AS + cz23) \cos(f1 - \\
& - fd23 u - fs23 + t) + ASi12 \cos(f1 + fd23 u + fs23 + t) + cx23 i12 \sin(f1 + \\
& + fd23 u + fs23 + t) + cx23 i12 \sin(f1 - fd23 u - fs23 + t) + cz23 i12 \cos(f1 + \\
& + fd23 u + fs23 + t))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
NVS = & fd23 R23 (cx23 + R23 \sin(fd23 u + fs23)) (\sin(f1) \sin(t) \sin(fd23 u + \\
& + fs23) - \cos(f1) \cos(t) \sin(fd23 u + fs23))
\end{aligned}$$

(2.10)

#### Ділянки 45:

$$\begin{aligned}
NVf = & -(1/2) fd45 R45 (cx45 + R45 \sin(fd45 u + fs45)) (2 A0i12 \cos(fd45 u + fs45) + \\
& + AEi12 \cos(f1 + fd45 u + fs45) + AEi12 \cos(f1 - fd45 u - fs45) - \\
& - AE \sin(fd45 u + fs45 - t) - AE \sin(fd45 u + fs45 + t) - i12 (AS + cz45) \cos(f1 - \\
& - fd45 u - fs45 + t) + ASi12 \cos(f1 + fd45 u + fs45 + t) + cx45 i12 \sin(f1 + \\
& + fd45 u + fs45 + t) + cx45 i12 \sin(f1 - fd45 u - fs45 + t) + cz45 i12 \cos(f1 + \\
& + fd45 u + fs45 + t))
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
NVS = & fd45 R45 (cx45 + R45 \sin(fd45 u + fs45)) (\sin(f1) \sin(t) \sin(fd45 u + \\
& + fs45) - \cos(f1) \cos(t) \sin(fd45 u + fs45))
\end{aligned}$$

- прямолінійна вершинна ділянка

$$NVf = -kz34Ra (AE \cos[t] + i12 (AS + kz34u + Z3) \sin[f1 + t])$$

$$NVS = kz34Ra \cos[f1 + t] \quad (2.11)$$

Розв'язок рівняння контакту будемо вести наступним чином: змінюючи значення параметру  $u$  в межах від 0 до 1, фіксуючи його і із систем рівнянь контакту знаходимо інші невідомі параметри  $t$  і  $f1$ . Далі підставляємо знайдені значення в рівняння (2,11) знаходимо лінію контакту на поверхні дискового інструменту підставляючи координати лінії контакту в рівняння (2,3) фіксуємо значення  $s02$  і будуємо лінію контакту в пл.  $Z3Y3$  отримуємо профіль зубчастого колеса.

Для експериментальної перевірки запропонованого способу обробки пропонується провести експеримент з обробки зубчастого колеса  $m6 Z26$ .

За запропонованими залежностями для наступних параметрів дискового інструменту товщина диску 3 мм, діаметр диску 100мм було проведено моделювання і за допомогою програми МАТЛАБ методом оптимізації було визначено значення ексцентриситету  $AE$  при якому відхилення профілю колеса отриманим таким інструментом було мінімальним, це значення становило 10мм, на рис 2.4 показаний профіль зубчастого колеса отриманий таким інструментом. При розрахунку профілю колеса радіус округлення  $R23$ ,  $R45$  складає 0,12 мм.



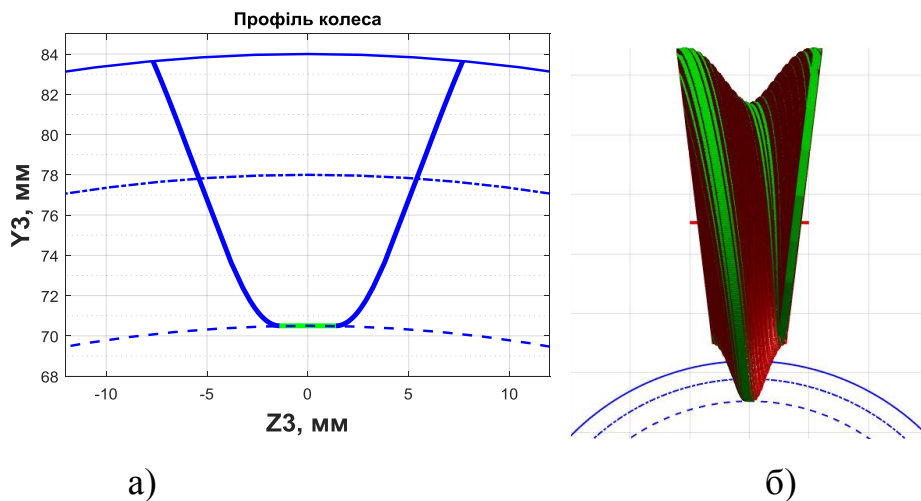


Рисунок 2.4 – Формоутворення зубчастого колеса дисковим інструментом.

а) Профіль зубчастого колеса отриманого дисковим інструментом D100мм, AE=10мм, B=3 мм при налаштуваннях на обробку зубчастого колеса m6 Z26,

б) послідовні положення поверхні дискового інструменту у западині зубчастого колеса.

Після того як розраховували необхідні параметри дискового інструменту необхідно згідно рекомендацій при MAO [69] забезпечити конструкцією інструменту зазор між поверхнею деталі та MAO інструментом, для цього зменшуємо товщину інструмента і перевіряємо зазор який буде утворюватись в процесі обробки. Для цього необхідно розробити методику його визначення при даній кінематичній схемі.

## 2.5 Графічний спосіб визначення зазорів між дисковим інструментом та поверхнею зубчастого колеса при обробці на зубофрезерному верстаті

Для визначення зазору використаємо можливості CAD системи КОМПАС 3D, а саме створюємо модель збірки (рис.2.5 ) за розрахованими значеннями дискового інструменту та зубчастого колеса.

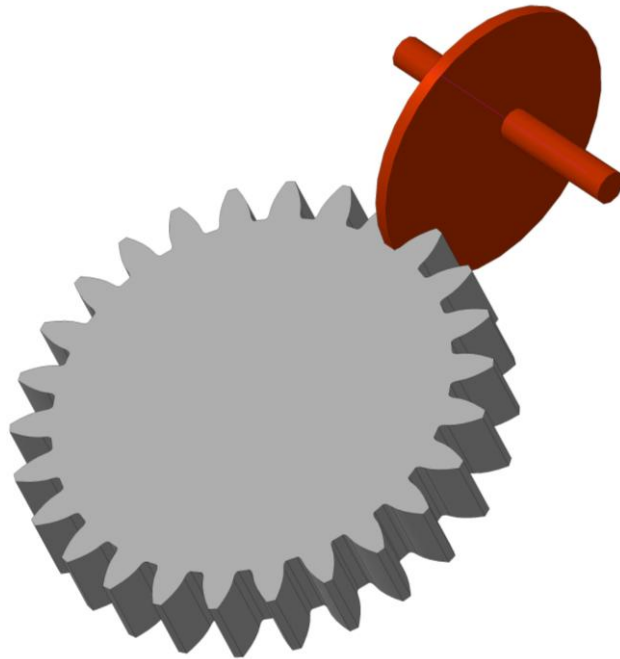
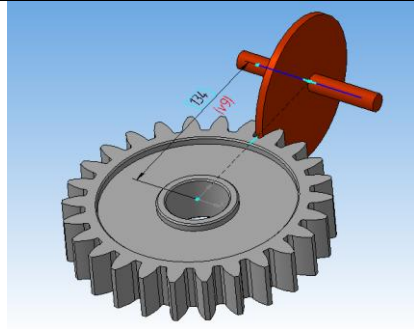
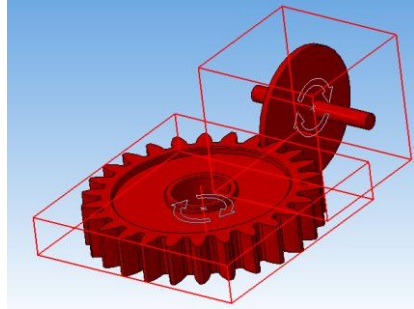


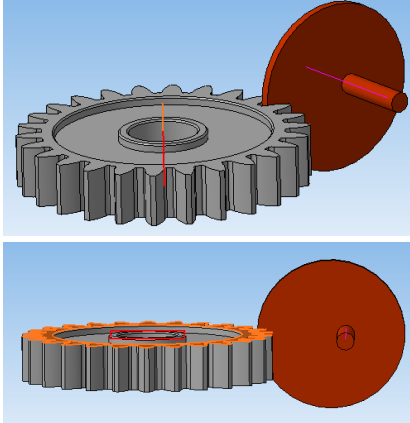
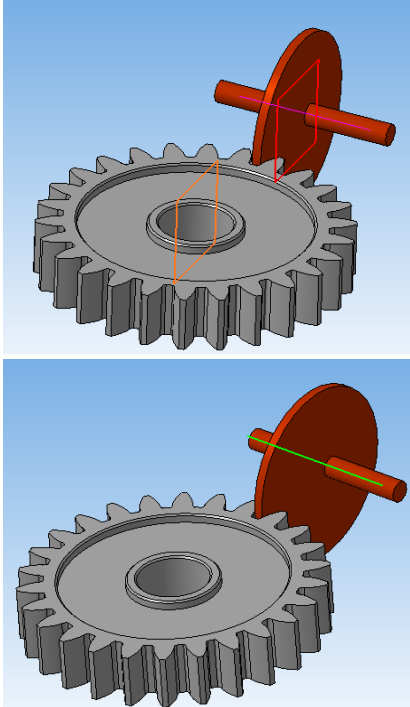
Рисунок. 2.5 – Модель збірки в CAD системи КОМПАС 3D.

Будуємо допоміжні елементи і накладаємо наступні обмеження наведено в табл.2.1

Таблиця 2.1 – Допоміжні елементи та обмеження в моделі збірки дискового інструмента та зубчастого колеса

Опис	Зображення
Створюємо збірку в CAD системи КОМПАС 3D, вставляємо в збірку зубчасте колесо та дисковий інструмент, вибираємо вісі координат дискового інструмента та зубчастого колеса. В збірці створюємо ескіз вісі дискового інструмента.	
Робимо « Сопряжение, вращение-вращение» дискового інструмента та зубчастого колеса з передаточним відношенням 26:1, а також обираємо напрямок обертання дискового інструмента та зубчастого колеса	

Продовження Таблиці 2.1 - Допоміжні елементи та обмеження в моделі збірки дискового інструмента та зубчастого колеса

Опис	Зображення
В «вращение –вращение» робимо «совпадение» зубчастого колеса по його вісі та прив'язку до верхньої частини зубчастого колеса і вісі дискового інструмента, щоб вони знаходились на одному рівні, що стосовно зубчастого колеса.	
Стосовно дискового інструмента в «вращение-вращение» робимо «совпадение» по площинам і осі дискового інструмента та зубчастого колеса.	

В результаті накладених зв'язків дана модель повністю відтворює рухи, які здійснюють інструмент і деталь на зубофрезерному верстаті, далі аналізуючи положення деталі і інструменту графічно визначаємо заори між ними.

На рис.2.6 зображено схематичне зображення установки дискового інструменту для МАО циліндричних зубчастих коліс, та показані міжосьові відстані отримане з розробленої 3д моделі збірки і в залежності від повороту інструмента отримані зображення проекції зубчатого колеса по відношенню до інструменту. (рис.2.7).

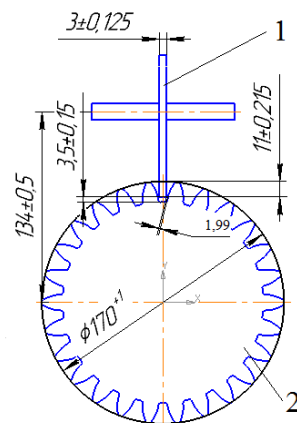


Рисунок 2.6 – Основні установочні розміри дискового інструмента для МАО  
циліндричного зубчастого колеса  
1 – дисковий інструмент, 2 – циліндричне зубчасте колесо

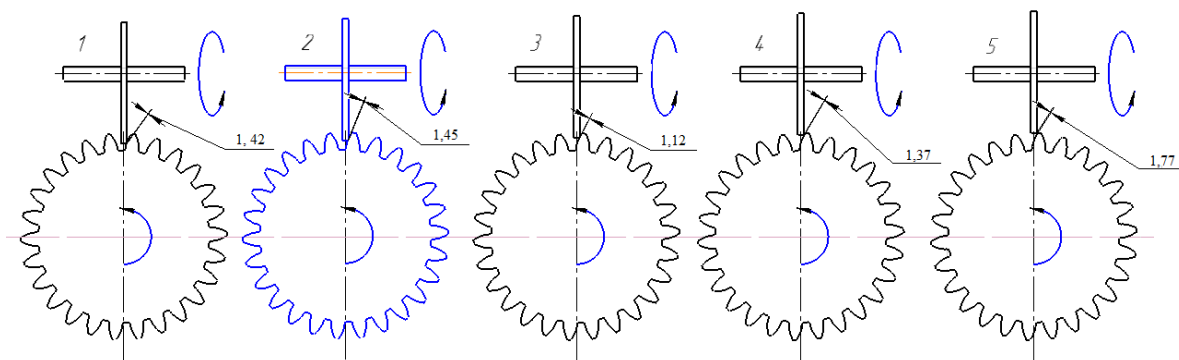


Рисунок 2.7 – Графічна перевірка установчих параметрів дискового інструмента

Графік зазору в залежності від радіуса дискового інструмента на якому мірявся зображено на рис.2.8.

**Графік зазору в залежності від радіуса дискового інструмента**

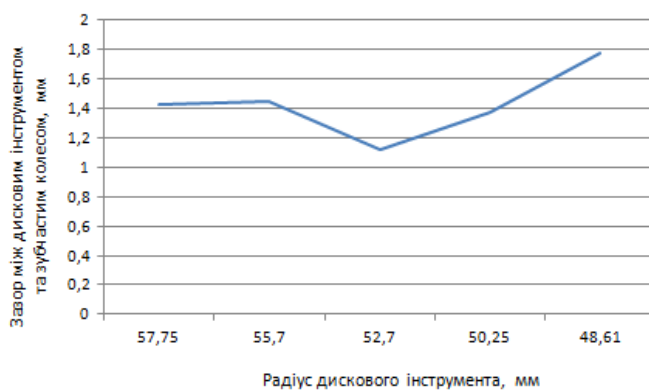


Рисунок 2.8 – Графік зазору в залежності від радіуса дискового інструмента

За результатами графічних побудов, яка наведена на рис.2.6, 2.7 отримали наступне, що мінімальний зазор між дисковим інструментом та зубом зубчастого колеса складає 1,12 мм. і на основі цих розрахунків розробляємо конструкцію МАІ для обробки зубчастого колеса.

### **Висновок:**

В даному розділі розроблено теоретичні основи визначення спряженого профілю прямозубого зубчастого колеса з дисковим інструментом в процесі обробки, який кінематично відповідає процесу зубофрезерування. Розроблено графічний спосіб перевірки визначення зазору між інструментом та деталлю в процесі обробки.

## РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ФОРМОУТВОРЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС ТА РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТУ

### 3.1 Вибір матеріалу корпусу інструмента

Виходячи з того, що інструмент буде працювати в магнітному полі, а також контактувати з намагніченими дрібними частками металу, а саме МАП, було вирішено виготовити дисковий інструмент з немагнітного матеріалу, а саме з Д16.

Матеріал Д16 широко використовується для виготовлення силових елементів конструкції літаків, також з даного матеріалу виготовляють кузова автомобілів, широко використовують для виготовлення труб, та інших деталей. Також матеріал досить легко піддається механічній обробці.

Хімічний склад сплаву Д16 наведено [70].

### 3.2 Визначення типу і матеріалу постійного магніту для його застосування при створенні дискового інструменту

Тип постійного магніту який буде тримати магніто-абразивний порошок обираємо із найбільш розповсюджених зараз на ринку і доступних, а саме неодимові. Які характеризуються найбільшою силою намагнічування і стійкістю до розмагнічування мають магніти зі сплаву неодим + залізо + бор (Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B).

Властивості даних магнітів наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Властивості магнітів

Клас	Залишкова магнітна індукція, мТ (кГс)	Коерцитивна сила, кА/м (кЕ)	Магнітна енергія, кДж/м <sup>3</sup> (МГс-Е)	Робоча температура, °С
N35	1170-1220 (11,7-12,2)	≥955 (≥12)	263-287 (33-36)	80
N38	1220-1250 (12,2-12,5)	≥955 (≥12)	287-310 (36-39)	80
N40	1250-1280 (12,5-12,8)	≥955 (≥12)	302-326 (38-41)	80
N42	1280-1320 (12,8-13,2)	≥955 (≥12)	318-342 (40-43)	80
N45	1320-1380 (13,2-13,8)	≥955 (≥12)	342-366 (43-46)	80
N48	1380-1420 (13,8-14,2)	≥876 (≥12)	366-390 (46-49)	80
N50	1400-1450 (14,0-14,5)	≥876 (≥11)	382-406 (48-51)	60
N52	1430-1480 (14,3-14,8)	≥876 (≥11)	398-422 (50-53)	60

Супермагніти призначені для використання в досить широкому діапазоні температур від -40 °С до +80 ... + 150 °С. Спеціальні марки для

більш широкого температурного діапазону до  $+200 \dots + 240$  °C мають трохи гірші магнітні властивості [72].

У цих магнітів лише два недоліки – крихкість та низька робоча температура. Так як в нашому експерименті робота ведеться без биття та в межах низьких температур від 20 до 100 °C було обрано саме цей вид магнітів [72].

### 3.3 Конструкція дискового інструменту

Відповідно до розрахованих параметрів інструменту а саме: діаметр 100мм, ексцентриситет 10мм, товщина диску з врахуванням зазору 3 мм і магніти обираємо за формою круглі діаметром 12 мм і товщиною 3 мм розробляємо експериментальний зразок МАО інструменту.

Це буде Дисковий інструмент для обробки МАО має форму диска з ексцентричною віссю та отворами для встановлення неодимових магнітів, кількість отворів повинна бути кратною тому що всі неодимові магніти встановлюються в дисковий інструмент з різною полярністю по черзі (рис.3.1), тобто спочатку встановлюємо позитивним полюсом до гори, то наступний неодимовий магніт вставляється негативним полюсом до гори і таким чином всі неодимові магніти потрібно встановлювати в шаховому порядку. Корпус дискового інструмента зображено на рис.3.2. Корпус складається з диска в якому прорізані отвори для неодимових магнітів та проточених канавок для утримання МАП.

Ексцентрична вісь інструмента слугує для того, щоб інструмент міг робити перехід при обробці МАО на наступний зуб циліндричного зубчастого колеса.

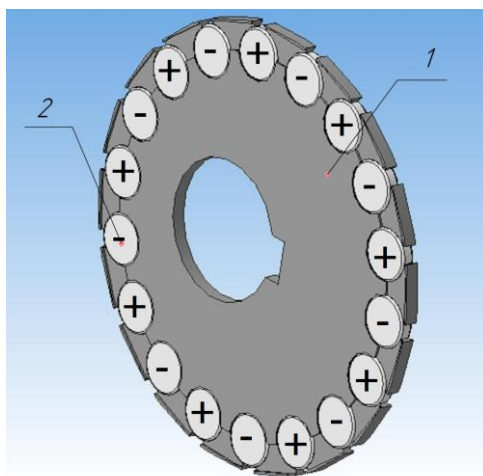


Рисунок 3.1 – Дисковий інструмент для оброблення МАО  
1 – диск, 2 – неодимові магніти

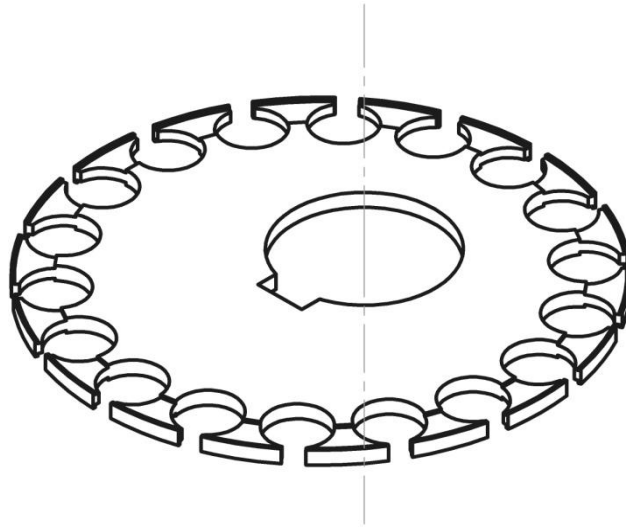


Рисунок 3.2 – Корпус дискового інструмента

На лицьовій та тильній стороні дискового інструмента є канавка, яка слугує для того, щоб при обробці МАО кінетичні сили які будуть виникати при обертанні диску не викидали МАП з робочої частини дискового інструменту для МАО (рис 3.3).



Рисунок 3.3 – Утримуючі канавки МАП дискового інструменту для МАО

Також на кожному отворі для встановлення неодимових магнітів є прорізи (рис.3.4).



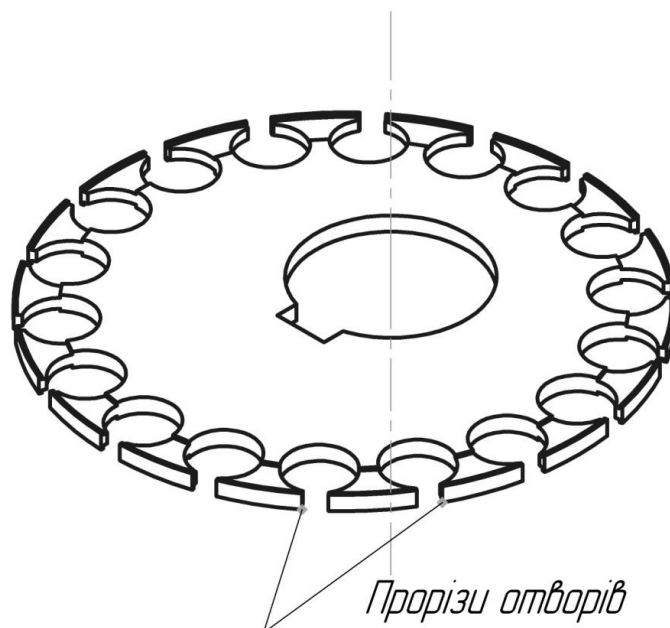


Рисунок 3.4 – Прорізи отворів дискового інструмента для МАО

Прорізи на отворах для неодимових магнітів в дисковому інструменті слугують для того, щоб утримувати МАП, а також для правильного розподілення магнітного поля.

Неодимові магніти для дискового інструмента зображені на рис.3.5.

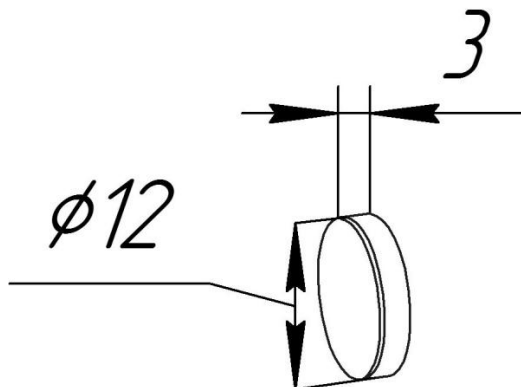


Рисунок 3.5 – Неодимові магніти які використовуються в дисковому інструменті

Дисковий інструмент в зібраному стані зображено на рис. 3.5 у вигляді 3D моделі.

Креслення інструменту зображено в Додатку А. Основні розміри дискового інструмента наведено на рис.3.6.

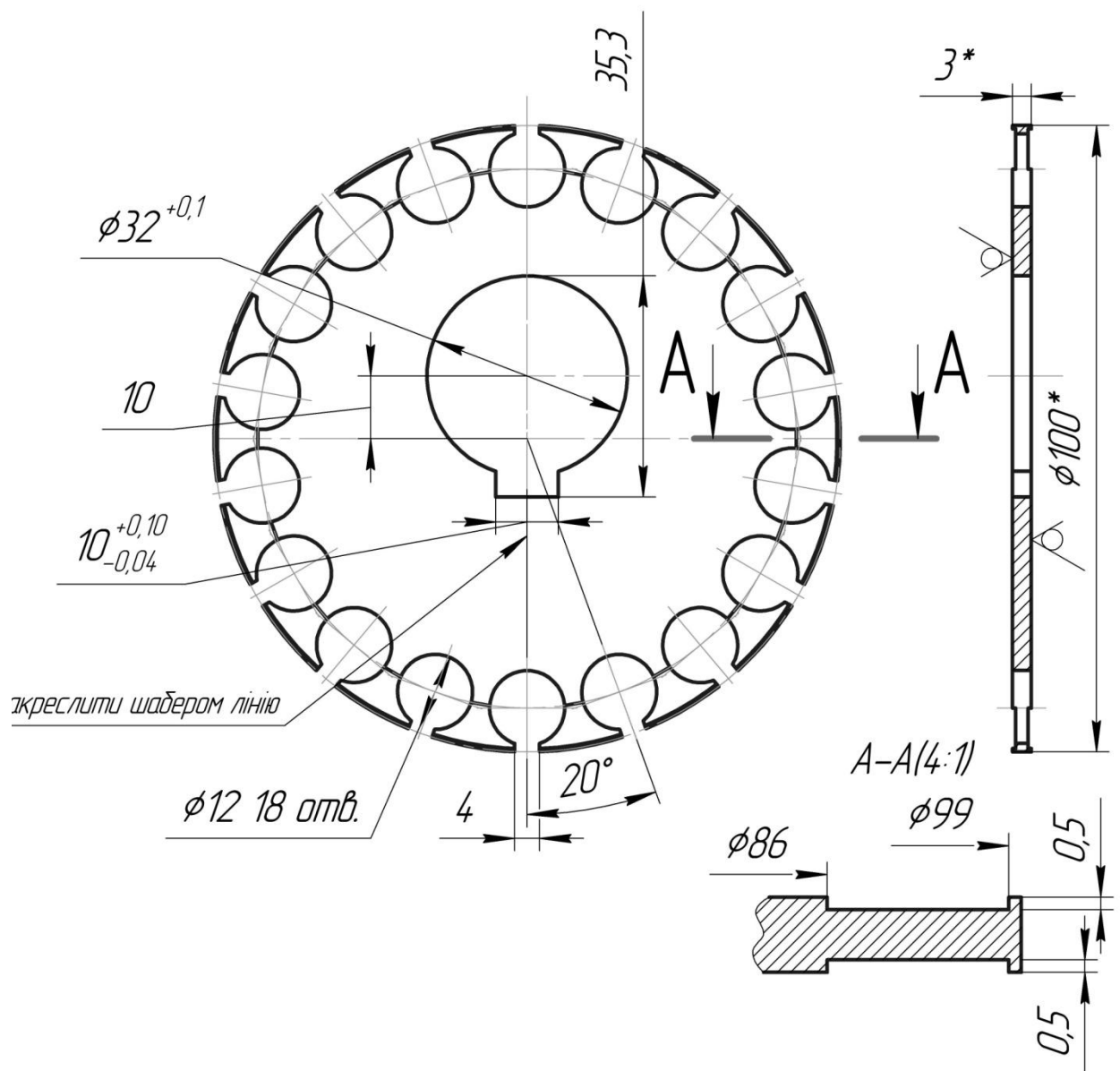


Рисунок 3.6 – Основні розміри дискового інструмента

## Висновки

В даному розділі, була здійснена робота щодо вибору матеріалу для виготовлення дискового інструмента, також був зроблений аналіз магнітів які плануються використовувати в дисковому інструменті для фінішної обробки, та показана конструкція інструмента.

## РОЗДІЛ 4. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ЛАБОРАТОРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 4.1 Матеріали які використовувались в ході проведення лабораторних досліджень

Дослідження МАО зубчастого колеса проводили на циліндричному зубчастому колесі по ГОСТ 6512 – 7. Схематичне зображення циліндричного зубчастого колеса представлено на рис. 4.1 [71].

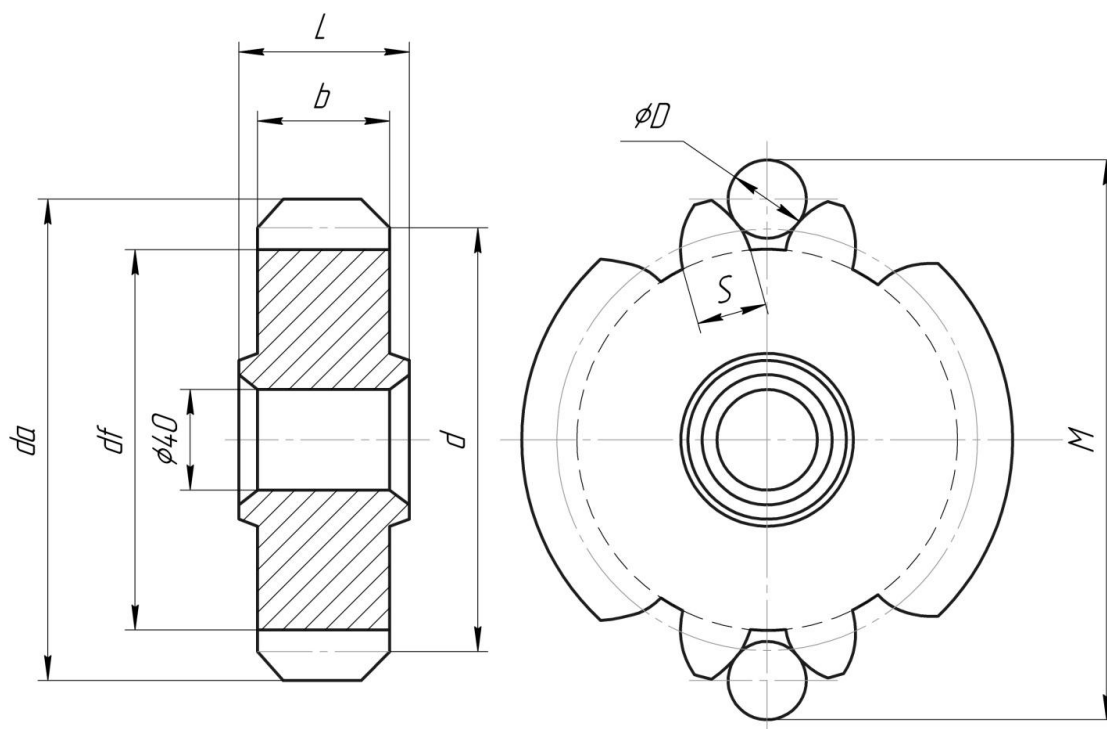


Рисунок 4.1 – Ескіз циліндричного зубчастого колеса по ГОСТ 6512 – 74

Основні розміри зубчастого колеса, яке використовувалось в лабораторних дослідженнях наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні розміри циліндричного зубчастого колеса

Модуль, m		6
Кількість зубів, z		26
Діаметр вимірювального ролика, D		10,353
Розмір по роликам, M		170,369
Повна висота зуба, h		13,74
Висота головки зуба, $h_a$		6,24
$\Delta V^*$ , роб.		25 18
Ширина вінця, b	Не менше	30
Ширина маточини, L		38

Циліндричне зубчасте колесо, яке використовувалось в лабораторних дослідженнях виготовлене з сталі марки ШХ15 по ГОСТ 801 – 78. Твердість на торці зуба складає 59...62 **HRC<sub>3</sub>** [71].

Зубчасті колеса широко використовуються в сучасній техніці, а саме в загальному та галузевому машинобудуванні, верстатобудуванні, автомобільному будівництві, приладобудуванні та інших галузях.

Отже, механізм, який за допомогою зубчастого зачеплення декількох зубчастих коліс передає або перетворює рух із змінною кутовою швидкістю і обертального моменту називають зубчастими передачами [76].

Перевагами зубчастих передач є такі фактори, як висока навантажувальна здатність і як наслідок малі габарити, висока надійність та довговічність роботи зубчастих передач, високий коефіцієнт корисної дії (ККД), постійне передаточне відношення, можливе використання в широкому діапазоні швидкостей, потужностей та передаточних відношень.

Також зубчасті передачі мають деякі недоліки, а саме підвищені вимоги до точності виготовлення, виникнення шуму при високих швидкостях обертання, висока жорсткість [76].

На рисунку 4.2 зображено циліндричне зубчасте колесо, яке використовувалось для проведення експериментів.



Рисунок 4.2 – Зображення циліндричного зубчастого колеса

## **4.2 Магнітно-абразивний порошок, яки використовувався для дослідження МАО циліндричного зубчастого колеса**

До основних фізико-хімічних властивостей МАП, які визначають його якість можна віднести такі параметри, а саме: магнітні властивості МАП, твердість МАП, реакційна здатність по відношенню до оброблюваного виробу, міцність МАП, а також структура та геометрія його частинок [72].

При МАО в постійних магнітних полях, функцією яких є фіксування частинок МАП в нерухомому стані, крім максимальної намагніченості, частки повинні володіти якомога більшою магнітною проникністю в робочих полях. Це дозволяє досягти максимальної намагніченості МАП у відносно невисоких магнітних полях, що спрощує конструкцію магнітної системи верстата, дозволяє зменшити її габарити [72].

Зробивши аналіз науково-технічної літератури, можна зробити такий висновок, що в ній відсутня повна інформація про геометричні та мікрогеометричні параметри окремих частинок МАП, які використовуються для формування МАІ. А саме вони будуть визначати область та ефективність використання тих чи інших типів порошків, умов їх контактної взаємодії з оброблюваними поверхнями і визначати характер їх впливу [72].

При експериментальних дослідженнях було використано такий порошок:, як Феромап 400/315 мкм (Поліам Т) і він зображений на рис. 4.3.

Також в залежності від способу отримання МАП, їх умовно можна поділити на декілька типів форм частинок:

- Осколкові, які отримані в результаті розмелу попередньо гранульованих з розплавів систем Fe-Si-Ti-C, Fe-Si-C матеріалів, які мають практично безпористу структуру. Прикладами таких осколкових порошків можна вважати: Поліам Т, Феромап, ДЧК (ДЧКн, отримана в результаті розмелу попередньо гранульованих матеріалів, ДЧКб/у, яка попередньо використовувалася на установках струминно-абразивного оброблення з наступною магнітною сепарацією).

- Округлі, які отримані в результаті розпилення розплавів системи Fe-Si-C, Fe-C-Si-Al без наступного розмелу. Прикладами округлих порошків можна вважати ПР Р6М5, Поліам Мсф.

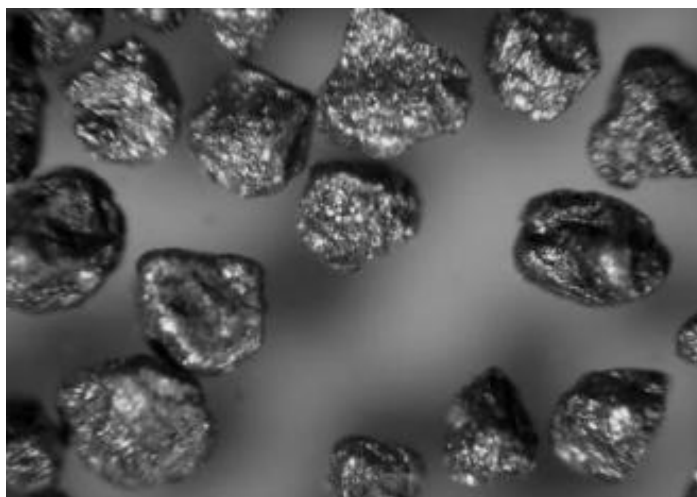


Рисунок 4.3 – Зовнішній вигляд Феромап 400/315, який був використаний в лабораторних дослідженнях [72]

Частинки МАП мають неправильну геометричну форму, це чітко видно на рис. 4.3. Різниця у геометричній формі окремих частинок МАП одного складу або походження визначається способом отримання, додатковим обробленням, методом сепарації та іншими факторами. Незалежно від методу отримання МАП, кожне окреме зерно має на своїй поверхні різальні кромки, які характеризуються відповідними мікрогеометричними характеристиками [72].

Якщо розглядати загальні випадки використання МАП, то в процесі МАО використовують порошкові матеріали з достатньо широким фракційним складом від 100/63 до 1000/630 мкм, за допомогою яких можна отримати різні параметри оброблюваних поверхонь [72].

#### **4.3 Зубофрезерний напівавтомат 5A312 на якому виконувалось МАО**

У лабораторних дослідженнях використовувався зубофрезерний напівавтомат мод. 5A312, який зображено на рис. 4.4, основні характеристики верстата наведені в таблиці 4.2 Наладка зубофрезерного верстату зображено на рис.4.5.

Зубофрезерний верстат мод. 5A312 призначений для обробки циліндричних зубчастих коліс з прямими та спіральними зубами в умовах серійного та крупносерійного виробництва [73].

Найбільш вигідно використовувати верстат для напівчистої обробки зубчастих коліс ( під наступне оброблення шевінгуванням), крім цього верстат може бути використаний для нарізання зубчастих коліс 7-ої степені точності по ГОСТ1643-56 при чистових режимах обробки.

Розміри оброблюючих виробів наведені з урахуванням використання цільних чистових однозахідних черв'ячних фрез загального призначення по ГОСТ 9324-60, причому косозубі зубчасті колеса з правим напрямом спіралі оброблюються фрезами з правим напрямом спіралі, а косозубі колеса з лівим напрямом спіралі оброблюються фрезами з лівим напрямом спіралі [73].

A 3D exploded view of the 1000W power supply unit, showing its internal components and their assembly points. The unit is primarily black with some silver-colored internal parts. The components are numbered as follows:

- 1: Bottom case
- 2: Middle case
- 3: Top case
- 4: Top cover
- 5: Top cover screw
- 6: Top cover screw
- 7: Top cover screw
- 8: Top cover screw
- 9: Top cover screw
- 10: Top cover screw
- 11: Bottom case screw
- 12: Bottom case screw

Зубофрезерний верстат складається з нижньої станини 1, в піддоні якої розміщено резервуар гідравлики з показниками рівня мастила 12, а також резервуар охолоджувальної рідини з показниками рівня мастила 11. На піддоні закріплена верхня станина 2 з горизонтальними направляючими для переміщення столу з виробом. У верхній станині 2 знаходяться механізми подачі, а також механізм диференціала зі своїми гітарами, а також механізм переміщення столу. В верхньому корпусі 4, закріпленому на станині 2, розміщене електрообладнання з пультом керування 3, а також верхній центр 5 з пінолью 7. Стіл, який переміщують по вертикальним направляючим

станини разом з гітарою ділення, яка закрита кожухом огорожею. Гітара ділення знаходиться за дверима 10 [73, 74, 75].

Супорт 6 знаходиться на стійці та переміщується разом з нею при обертанні валика 8. Частота обертання інструмента налаштовується змінними шківками, які знаходяться за дверима в задній частині верстата [73, 74, 75].



Рисунок 4.5 – Зубофрезерний верстат 5А312 та його наладка при МАО циліндричного зубчастого колеса по ГОСТ 6512 – 74

Таблиця 4.2 – Основні характеристики зубофрезерного напівавтомату мод. 5А312

Найбільший діаметр нарізаємого колеса, мм.	320
Найбільший модуль нарізаємого колеса, мм.	6
Найбільша ширина нарізаємого колеса при $\beta=0$ , мм.	180
Найбільший діаметр фрези, мм.	160
Осьова подача, мм/об.	0.25-6
Радіальна подача, мм/об.	0.3-6
Потужність двигуна головного приводу, кВт.	7.5
Габаритні розміри в плані, мм.	2000x1240
Маса, кг.	5250
Клас точності верстата за ГОСТ659-67	Н
Додаткові можливості верстата.	Кроковий механізм осьового переміщення фрези.



#### 4.4 Налаштування та режими верстату, якій використовувались в ході проведення лабораторних експериментів

При налаштуванні зубофрезерного верстата мод.5А312 необхідно виконати такі дії, а саме [73, 74, 75]:

- встановити змінні шківів в головному приводі верстата,
- налаштувати гітару ділення, диференціала та подачі,
- встановити інструмент та виріб,
- встановити міжцентрові відстані ,
- встановити напрямлення подачі,

Для коректного процесу МАО потрібно виставити шківів в головному приводі так, щоб досягти максимальних обертів шпинделя з дисковим інструментом. Зазвичай всі параметри для налаштування верстата можна знайти в його паспорті.

В паспорті зубофрезерного верстата мод.5А312 вказані розміри шківів, які необхідно встановити для того щоб отримати необхідну швидкість обертання.

В таблиці 4.3 вказана максимальна швидкість головного руху зубофрезерного верстата мод.5А312 [73].

Таблиця 4.3 – Ступінь швидкостей головного руху

Число обертів інструмента, хв.	Діаметри шківів	
	А, мм	Б, мм
500	255	180

Схематичне зображення встановлення шківів зображено на рис.4.5

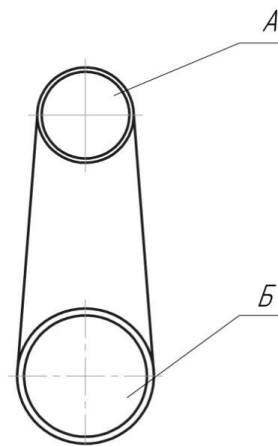


Рисунок 4.6 – Схематичне зображення встановлення шківів  
А – ведучий шків, Б – ведений шків

При налаштуванні числа обертів шпинделя з дисковим інструментом потрібно слідкувати, щоб числа обертів шпинделя циліндричного зубчастого колеса не перевищувало 25об/хв, швидкість ковзання ділильного черв'яка складає 5м/сек [73].

Виходячи з параметрів зубчастого колеса, яке буде оброблятися на зубофрезерному верстаті за допомогою МАО, потрібно налаштувати гітару подачі, гітару ділення та гітару диференціала. Параметри для налаштування гітари ділення наведено в таблиці 4.4, для оброблення або виготовлення кожне окреме зубчасте колесо має свої окремі параметри для налаштування [73].

Таблиця 4.4 – Параметри налаштування гітари ділення

Число зубів нарізаємого зубчастого колеса	Змінні зубчасті колеса			
	На ведучому валу, а	На пальці		На валу ділення d
		b	c	
26	48 мм	48 мм	60 мм	65 мм

На рис.4.7 зображена схема гітари зубофрезерного верстата

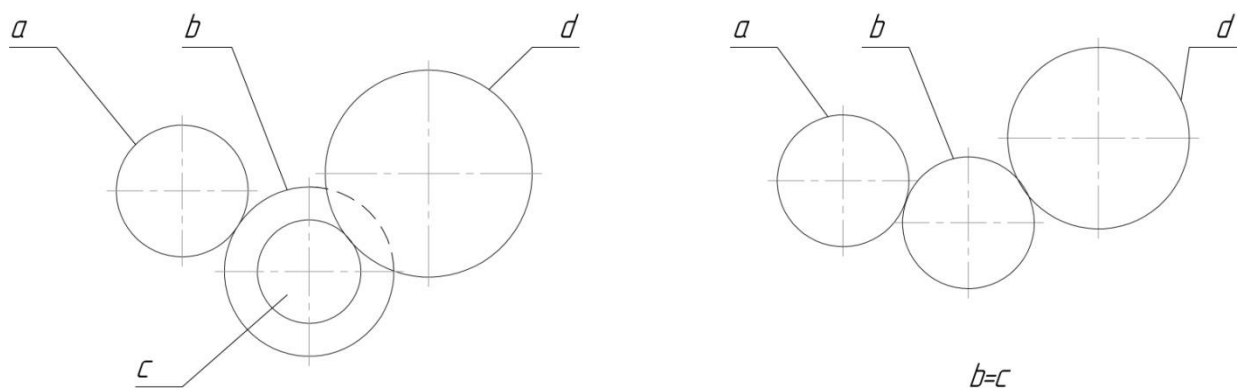


Рисунок – 4.7 Схема гітари зубофрезерного верстата

Формули для налаштування гітари наступні [73]:

$$\frac{24 \cdot K}{Z} = \frac{a \cdot c}{b \cdot d} = 0,923$$

Де, K – кількість заходів інструмента, Z – кількість зубів оброблюємого зубчастого колеса.

Гітара подачі налаштовується за допомогою наступних формул [73]:

$$\frac{aI}{bI} \cdot \frac{cI}{dI} = \frac{S}{28} = 0,34 \frac{\text{мм}}{\text{хв}}$$

Де,  $S'$  – подача в мм на один оберт зубчастого колеса, – число обертів за хвилину шпинделя дискового інструмента,  $K$  – число заходів дискового інструмента,  $Z$  – кількість зубів зубчастого колеса.

Ескіз гітари подачі зображено на рис. 4.8

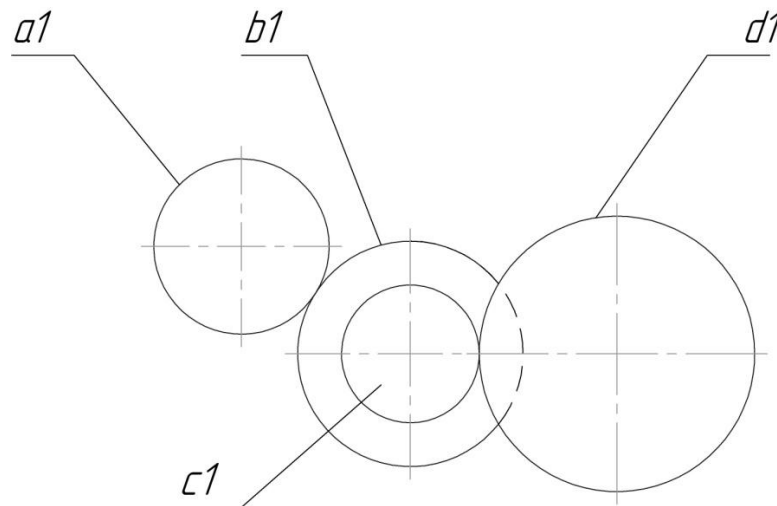


Рисунок 4.8 – Ескіз гітари подачі зубофрезерного верстата

Встановлення деталі та інструмента, здійснювали наступним чином, циліндричне зубчасте колесо, яке відіграє роль деталі встановлювали на вал, який безпосередньо з'єднаний з гітарою ділення, встановлення деталі зображене на рис.4.9

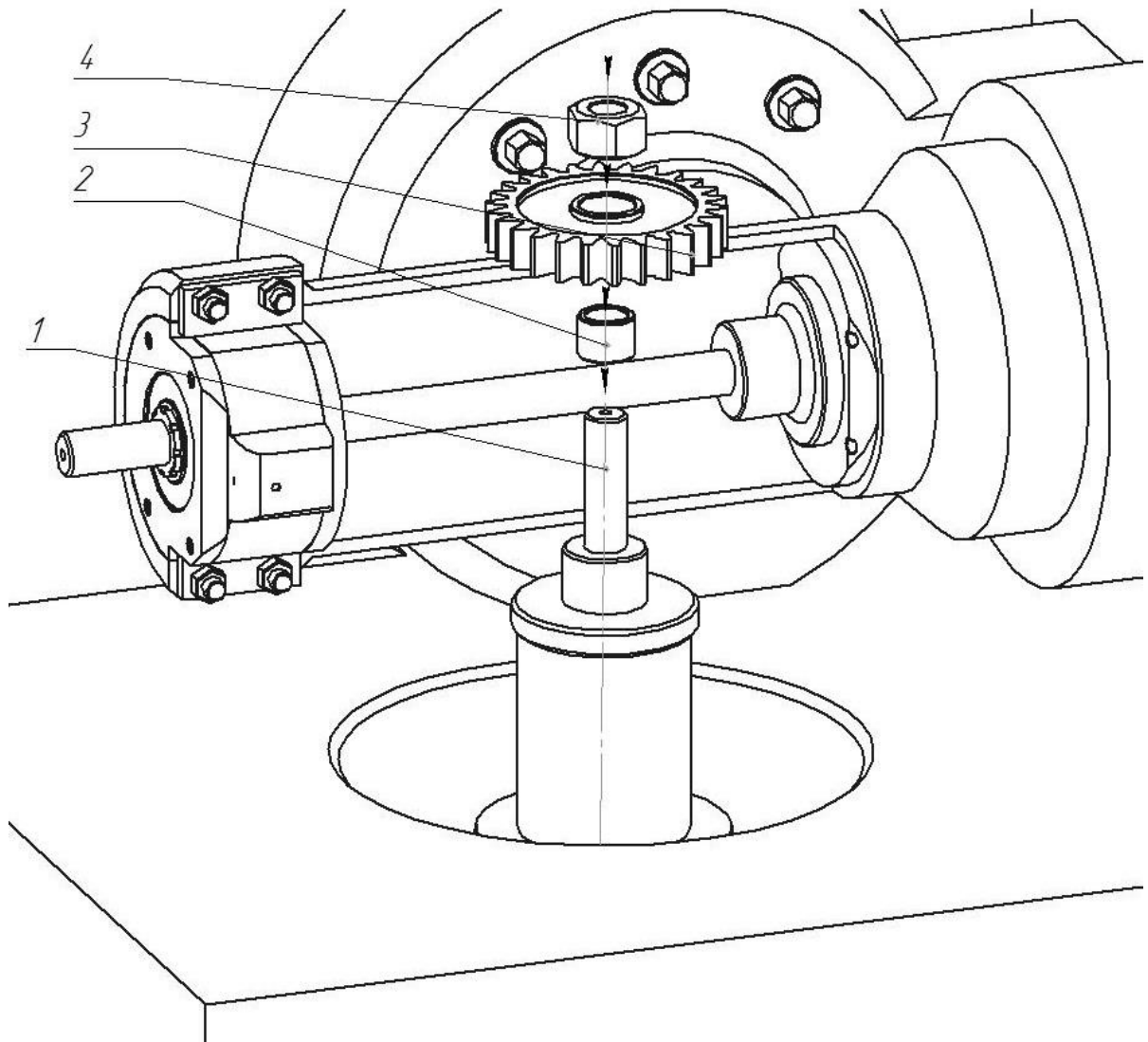


Рисунок 4.9 – Встановлення циліндричного зубчастого колеса на  
зубофрезерний верстат мод.5А312

1 – вал, 2 – перехідна втулка, 3 – циліндричне зубчасте колесо, 4 - гайка

На вал 1, який з'єднаний з гітарою ділення встановлює перехідна втулка 2, перехідна втулка не входить до комплектності зубофрезерного верстата, вона була спеціально виготовлена для того щоб усунути неспівпадання діаметра валу зубофрезерного верстата та посадочного діаметру циліндричного зубчастого колеса. Після встановлення перехідної втулки на неї встановлюється циліндричне зубчасте колесо 3, яке буде оброблятися і вся ланка фіксується гайкою 4.

Встановлення дискового інструмента на зубофрезерний верстат мод.5А312 виглядає наступним чином та зображено на рис.4.10.

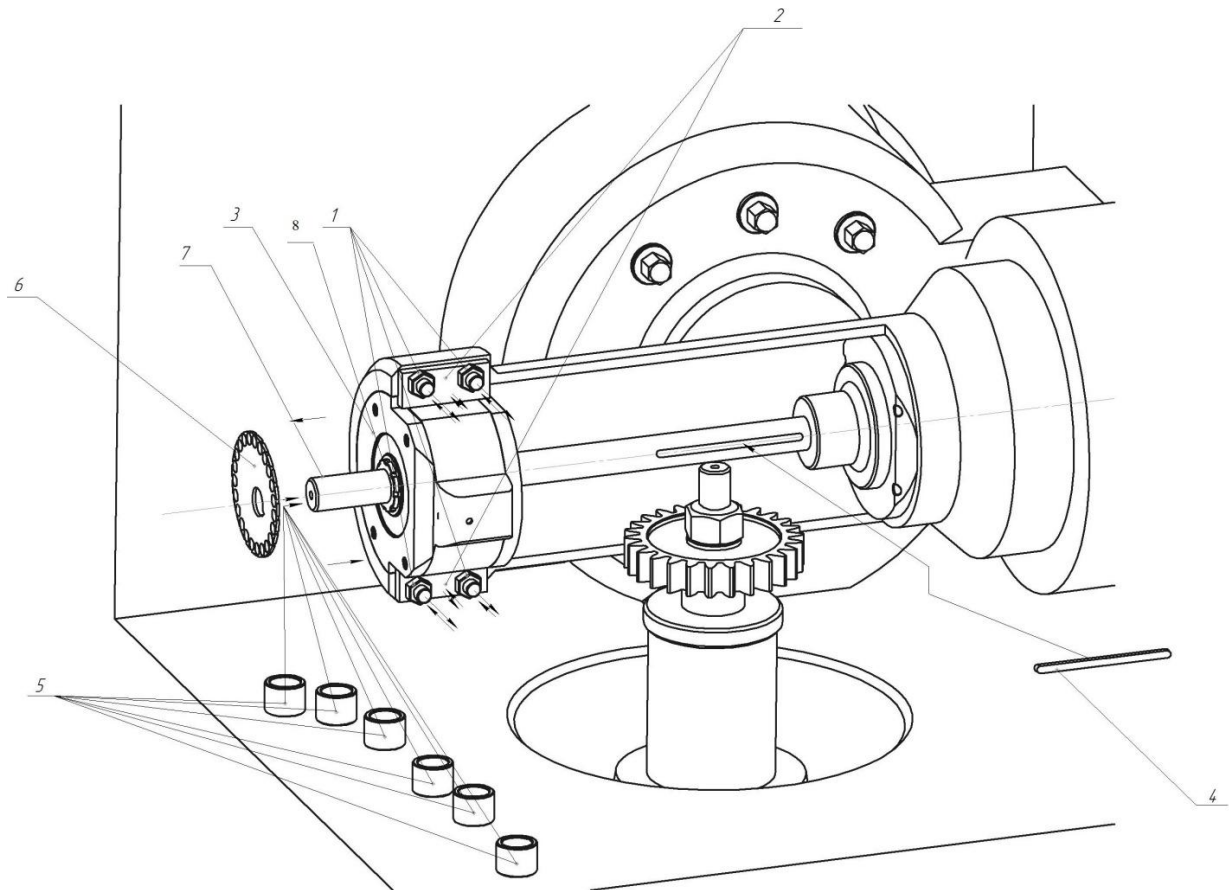


Рисунок 4.10 – Встановлення дискового інструмента на зубофрезерний верстат мод.5А312

1 – гайка, 2 – затискна пластина, 3 – підшипник шпинделя інструмента, 4 – шпонка, 5 – перехідні втулки, 6 – дисковий інструмент для МАО, 7 – вал шпинделя зубофрезерного верстата мод.5А312, 8 – гайка

Встановлення дискового інструмента на зубофрезерний верстат здійснюється таким чином, а саме, відкручуються гайки 1,8, затискні пластини 2, віджимаються від корпусу шпинделя та дають змогу зняти підшипник шпинделя 3, після зняття підшипника встановлюється шпонка 4 і на вал шпинделя 7 одягаються перехідні втулки 5, та дисковий інструмент 6. Перехідні втулки вдягаються на вал шпинделя таким чином, щоб у подальшому візуально дисковий інструмент 6 був по середині вала шпинделя інструмента.

Після завершення встановлення дискового інструмента разом з перехідними втулками одягається підшипник шпинделя інструмента та фіксується затискними пластинами за підтискається гайками.

Схематичне зображення встановленого дискового інструмента та оброблюваного циліндричного зубчастого колеса на зубофрезерний верстат мод.5А312 зображено на рис.4.11.

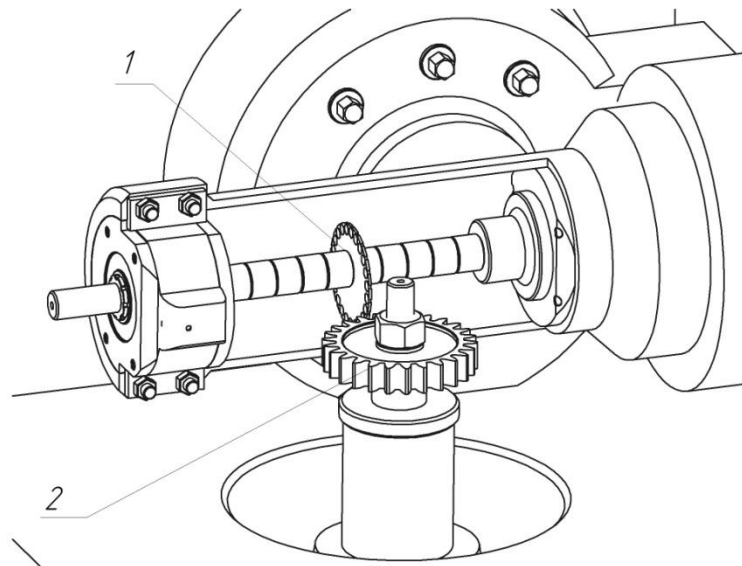


Рисунок 4.11 – Схематичне зображення встановленого дискового інструмента та циліндричного зубчастого колеса на зубофрезерний верстат мод.5А312

1 – дисковий інструмент для МАО, 2 – циліндричне зубчасте колесо

Після встановлення дискового інструмента для МАО та циліндричного зубчастого колеса потрібно виставити міжцентрові відстані. Міжцентрові відстані встановлюються за допомогою лімба 8, який зображено на рис.4.4 та знаходиться з правої сторони від панелі керування. Лімб дозволяє налаштувати міжосьову відстань по осі  $X$  (рис.4.12), а щоб налаштувати дисковий інструмент по осі  $Y$  (рис.4.12) потрібно обертати спеціальний вал, який знаходиться в задній частині корпусу шпинделя інструмента, також ці налаштування можливо провести за допомогою гідравлики, яка керується з пульта управління верстата.

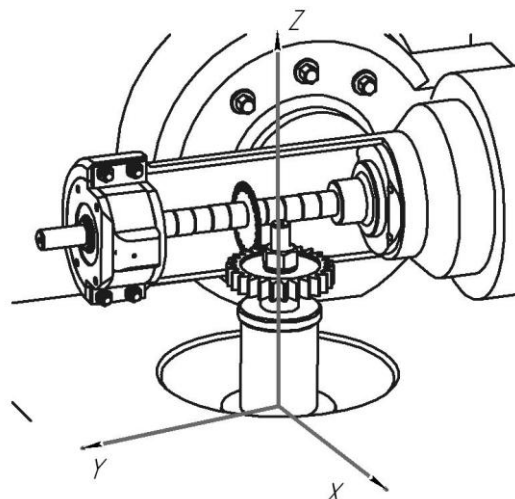


Рисунок 4.12 – Осі налаштування дискового інструмента

Також потрібно підняти циліндричне зубчасте колесо по осі Z, щоб його нижня сторона була на висоті, яка співпадає з віссю шпинделя інструмента.

#### 4.5 МАО циліндричних зубчастих коліс

Після всіх маніпуляцій з налаштуваннями верстату і установками дискового інструмента та циліндричного зубчастого колеса помістили МАП на дисковий інструмент (рис. 4.13) та приступили до МАО (рис. 4.14), оберти шпинделя складали 500 об/хв, а подача складала 0,5 мм/об.

МАО циліндричного зубчастого колеса здійснювалось в декілька етапів.

Перший етап МАО здійснювався з обертанням циліндричного зубчастого колеса за годинниковою стрілкою, а другий етап здійснювався з обертанням циліндричного зубчастого колеса проти годинникової стрілки. Це потрібно для того, щоб рівномірно обробити дві сторони зуба циліндричного зубчастого колеса. Зображення процесу МАО на зубофрезерному верстаті зображено на рис. 4.14



Рисунок 4.13 – Розміщення МАП на дисковому інструменті  
1 – МАП, 2 – дисковий інструмент, 3 – циліндричне зубчасте колесо





Рисунок 4.14 – Процес МАО циліндричного зубчастого колеса

#### 4.6 Результати лабораторних досліджень

Результатом лабораторних досліджень стала виміряна шорсткість поверхні зуба циліндричного зубчастого колеса після МАО. Шорсткість поверхні вимірювали за допомогою приладу для вимірювання шорсткості поверхонь MarSurf PS1 (рис.4.15).

Шорсткість поверхні зуба циліндричного зубчастого колеса вимірювались по десяти точкам для того щоб мінімізувати похибку при вимірах.



Рисунок 4.15 – Вимірювання шорсткості поверхні зуба циліндричного зубчастого колеса приладом MarSuf PS1



Результати вимірів шорсткості поверхні зуба циліндричного зубчастого колеса наведено в таблиці 4.5

Схема точок вимірювання наведена на рис.4.16

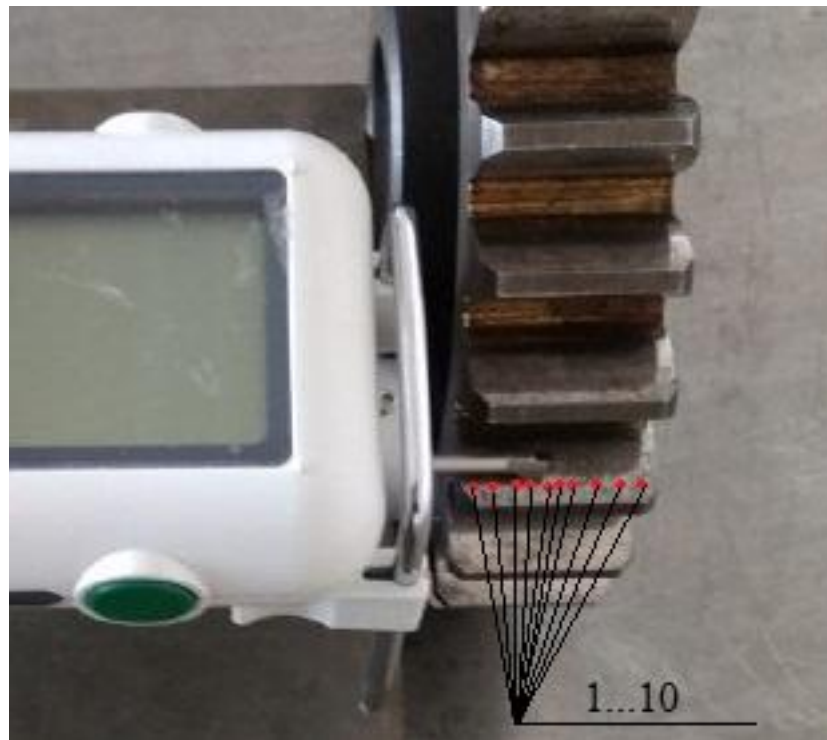


Рисунок 4.16 – Схема вимірювання шорсткості зуба зубчастого колеса по точкам

Таблиця 4.5 – шорсткість поверхні зуба циліндричного зубчастого колеса.

№ точки	до МАО		після МАО	
	Ліва сторона зуба, Ra	Права сторона зуба, Ra	Ліва сторона зуба, Ra	Права сторона зуба, Ra
	мкм	мкм	мкм	мкм
1	0,055	0,025	0,088	0,051
2	0,048	0,023	0,119	0,025
3	0,046	0,036	0,161	0,037
4	0,073	0,034	0,139	0,031
5	0,043	0,023	0,068	0,048
6	0,038	0,030	0,074	0,031
7	0,059	0,027	0,067	0,042
8	0,049	0,029	0,103	0,053
9	0,058	0,029	0,171	0,039
10	0,038	0,039	0,141	0,024

Продовження таблиці 4.5 – шорсткість поверхні зуба циліндричного зубчастого колеса.

Середнє значення	0,051	0,030	0,113	0,038
Абсолютна похибка 95%	0,008	0,004	0,028	0,007
Відносна похибка, %	15,241	13,133	24,519	19,523

За результатами вимірювань шорсткості поверхні обробленого зубчастого колеса, пояснити збільшення шорсткості поверхні деталі можна наступним що величина та тип абразивного порошку не відповідав початкової шорсткості деталі а саме початкова  $Ra=0.05$  та  $0.03$  відповідно це потребує подальших досліджень у цьому напрямку – технологічних параметрів процесу: розмір порошку та його форму і режимів обробки. Проте отримані результати дають змогу говорити, що за результатами експерименту показано можливість обробки такого типу деталей за запропонованою схемою. Також нерівномірність отриманої шорсткості на лівій та правій стороні зуба можна пояснити наступним (рис.4.17).

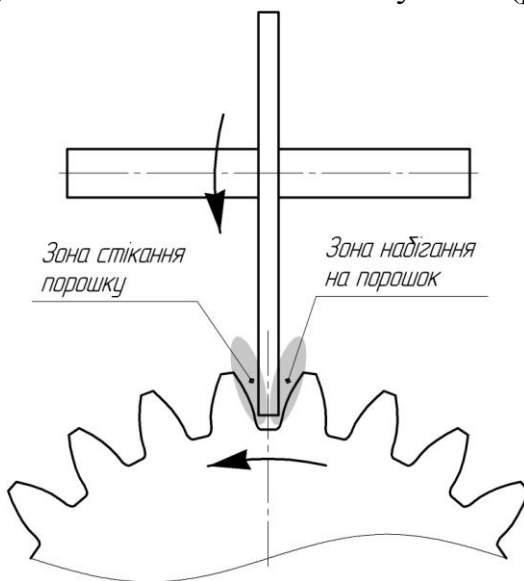


Рисунок 4.17 – Нерівномірність обробки дисковим інструментом при МАО.

Що при взаємному обертанні колеса та інструменту формується дві зони обробки зона набігання на порошок де інтенсивність зйому матеріалу буде більшою ніж в зоні стікання порошку де ця інтенсивність буде меншою і відповідно отримуємо різницю у вимірних жорсткостях на цих поверхнях зуба колеса. Щоб усунути цей недолік пропонується вести обробку зубчастих коліс у два цикла при прямому обертанні шпинделя інструменту і при

зворотньому, це легко реалізується на зубофрезерних верстатах шляхом зміни напрямку обертання шпинделя головного руху.

#### 4.7 Модернізація конструкції дискового інструмента

Відповідно до проведеного експерименту пропонується модернізувати конструкцію дискового інструмента для МАО, а саме додати механізм регулювання ексцентричної вісі, що дозволить створити універсальний інструмент для різного числа зубів колеса одного модуля за рахунок зміни ексцентриситету посадочного отвору інструменту. Ескіз модернізації інструмента зображений на рис.4.18.

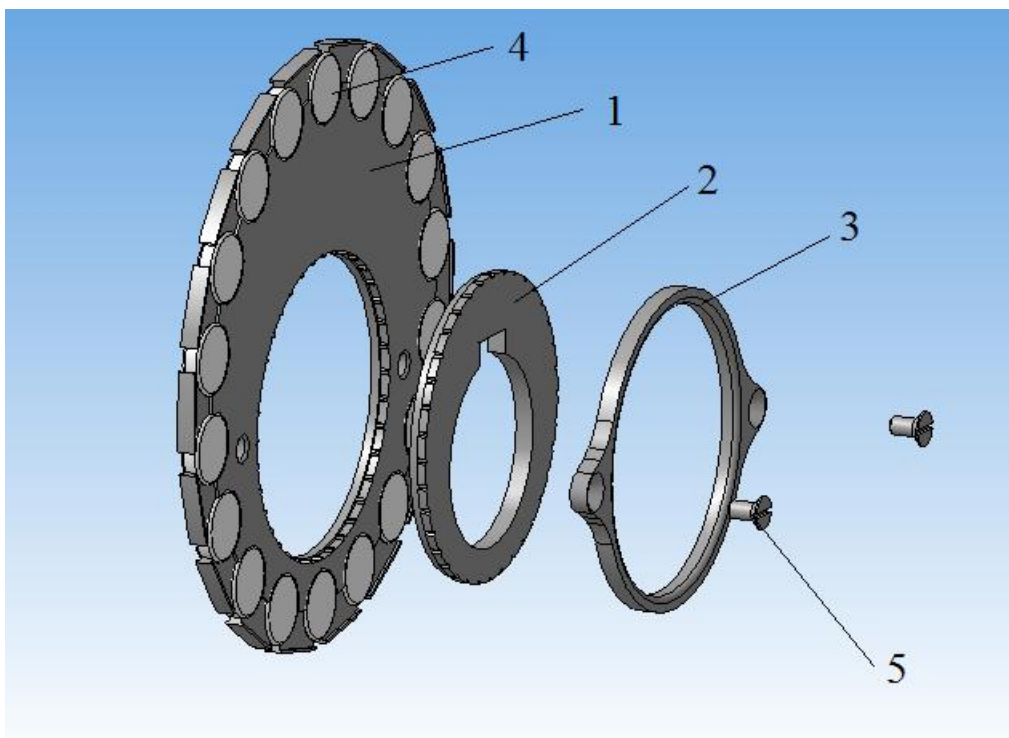


Рисунок 4.18 – Модернізація дискового інструмента для МАО

1 – дисковий інструмент, 2 – ексцентрична втулка, 3 – затискна пластина, 4 – магніти, 5 – гвинт

На рис.4.18 зображено затискну пластину 3, яка слугує для затискання ексцентричної втулки 2 за допомогою гвинтів 5, ексцентрична втулка вставляється в дисковий інструмент 1 в спеціальні шліці. Шліці дозволяють утримувати ексцентричну втулку, щоб уникнути прокручування.

Для того щоб змінити відстань ексцентричної осі потрібно ексцентричну втулку переставити на потрібний шліць, таким чином можна регулювати відстань осі ексцентрика від осі дискового інструмента.

Така модернізація інструмента дозволяє змінювати відстань ексцентричної осі від осі диска. Мінімальна та максимальна відстань від осі зображена на прикладі схеми фіксування ексцентричної втулки в різних положеннях рис.4.19.

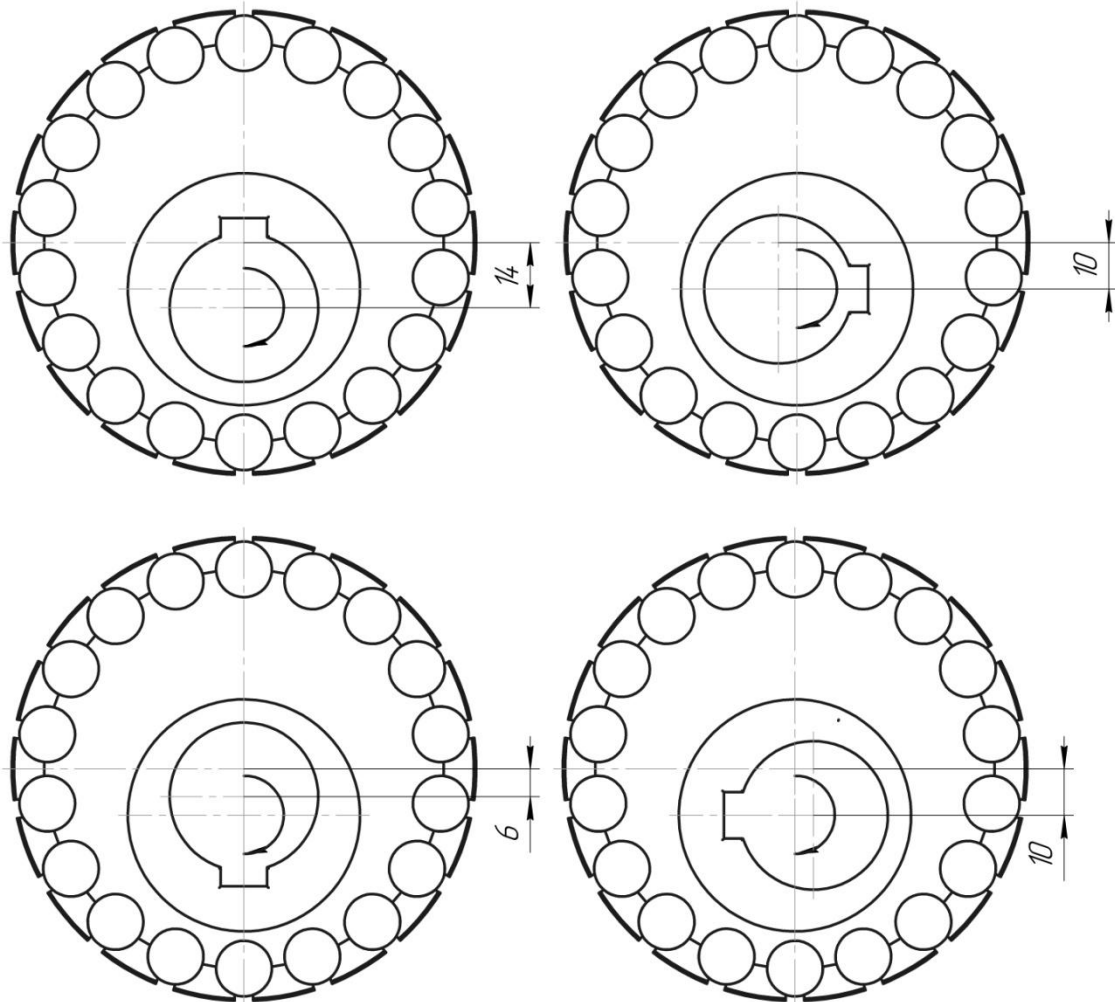


Рисунок 4.19 – Схематичне зображення регулюючої ексцентричної осі дискового інструмента в залежності від кута повороту ексцентричної втулки

Отже, мінімальна відстань від осі диска та осі ексцентричної втулки складає 6 мм, а максимальна відстань складає 14 мм.

Креслення модернізованого дискового інструмента зображене в Додатку Б, основні розміри модернізованого дискового інструмента зображено на рис.4.20.

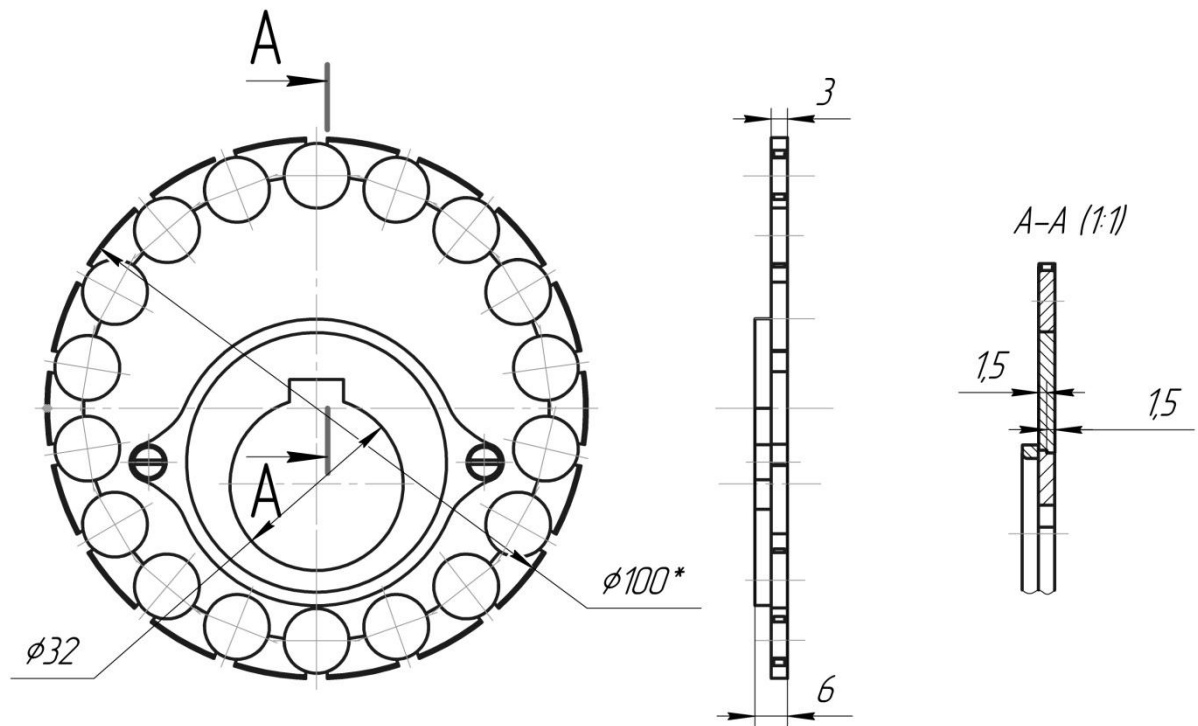


Рисунок 4.20 – Основні розміри модернізованого дискового інструмента

### Висновки:

Розраховано та виготовлено експериментальний зразок дискового інструменту для МАО який працює методом обкатки за кінематичною схемою зубофрезерування.

Показано можливість застосування такого інструменту для обробки зубчастих коліс.

Запропоновано конструкцію універсального інструменту дискового типу для обробки зубчастих коліс одного модуля.

## **РОЗДІЛ 5. СТАРТАП ПРОЕКТ РОЗРОБКА ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ФІНІШНОГО ОБРОБЛЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛІС**

### **5.1 Опис ідеї проекту та її зміст**

Ідеєю проекту є розробка інструменту для фінішного оброблення зубчастих коліс методом обкату з додатковим використанням магнітного поля в зоні оброблення. Даний інструмент призначений для видалення задирів, деформованого поверхневого шару які виникли при нарізанні зубчастих вінців, також при термічній обробці або при транспортуванні, досягається зменшення шорсткості поверхні зубів, збільшення контактної міцності коліс.

Так як на сьогоднішній день дуже стрімко розвиваються наступні галузі: автомобілебудування, залізничне машинобудування, авіаційна промисловість, суднобудування, верстатобудування, та ін., в кожній із цих галузей використовують циліндричні зубчасті колеса, на даний час при виготовленні коліс на фінішних операціях використовують операцію зубохонінгування, під час цієї операції інструмент ( хон) обробляє зубчасте колесо методом обкату. Недоліком даного способу є те, що для кожного з зубчастого коліс виготовляють свій хон, який підходить тільки для певного зубчастого колеса,

Перевагою розробленого інструменту є економічність так як має можливість багаторазового використання – універсальний, який буде мати хороші показники по таким параметрам як: зносостійкість, ефективність, термостійкість, стабільність роботи. який можна відновити та експлуатувати знову.

Таким чином, запропонована ідея дозволяє підприємству не купувати новий, досить дорогий інструмент, а використовувати один інструмент, який зможе обробляти велику кількість зубчастих коліс одного модулю.

## 5.2 Можливі напрямки застосування

Запропонована ідея розрахована на підприємства, які знаходяться в великих містах і спеціалізуються у виготовленні або поновленні зубчастих коліс.

Розробка нового універсального інструменту дозволить уникнути затрат у часі, великої кількості витрачених грошей на новий інструмент (хон), який має обмежений спектр використання.

### 5.2.1 Основні вигоди, що може отримати користувач товару

Користувач отримує переваги одразу в декількох напрямках, а саме: в часі та витрачених коштах, в універсальності інструменту та якості оброблення зубчастих коліс. Після зубохонінгування та за допомогою магнітно-абразивного оброблення (МАО) стійкість зубчастих коліс збільшується в 1,8 раз, відбувається збільшення твердості приповерхневого шару на глибину 150 – 170 мкм, відсутня. Крім того, вигода користувача в тому, що використання даного інструменту не потребує високої кваліфікації працівника, що значно знижує затрати.

Зведені параметри запропонованої ідеї наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Розробка інструменту для зубохонінгування	1. Машинобудівельна галузь	Збільшення площі контакту зубів, зменшення шуму
	2. Верстатобудівельна галузь	Збільшення при поверхневої міцності впадин зубчатих коліс, зменшення шуму

Продовження Таблиці 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

	3. Авіаційна промисловість	усуненні задири і пошкодження поверхні зубів, які виникли при нарізанні зубчастих вінців, також при термічній обробці або при транспортуванні, досягається зменшення шорсткості поверхні зубів шевінгованих і шліфованих коліс, зниження рівня шуму, збільшення контактної міцності коліс, а найголовніше підвищиться поверхнева міцність металу впадин зубчастих коліс
--	----------------------------	---

### 5.3 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

Порівняння проводилось за такими техніко-економічними характеристиками як економічні, технічні, надійності, технологічні та експлуатаційні. Дані критерії входять до методик оптимізації технологічних процесів та є такими, що висвітлюють найбільш об'єктивне положення в галузі машинобудування.

До основних конкурентів можна віднести наступні компанії: Reishauer, Gleason. Компанія Reishauer займається освоєнням і розробкою технології зубошліфування, зубохонінгуванняв кінці 40-х років минулого століття для фірми Reishauer (Швейцарія) стало початком її стрімкого розвитку і становлення в якості одного їх найбільших виробників верстатів. Проведені компанією детальні дослідження різних способів обробки зубів визначили головний напрямок всієї її подальшої діяльності - виготовлення обладнання, що реалізує метод безперервного обкатані зубошліфування черв'ячним шліфувальним кругом. Довгі роки наполегливої роботи в обраній сфері



дозволили фірмі Reishauer розробити ряд власних технічних ноу-хау і зайняти лідируючі позиції з постійно зростаючою часткою на світовому ринку верстатобудування.

В ході численних досліджень фірми ефективність використання саме обкатані методу для фінішної обробки зубчастих коліс (в тому числі загартованих) по відношенню до переривчастого профільного шліфування двостороннім конічним колом була переконливо доведена даними по точності і продуктивності.

Компанія Gleason устаткування для хонінгування від фірми Gleason доповнює і підтримує процес шліфування загартованих ЗК і верстати Gleason Hurth Spheric™. Spheric™ Honing або Power Honing - це процес шліфування загартованих ЗК, завдяки якому досягається високоякісна кінцева геометрія зубів ЗК на загартованих ЗК, а також поліпшується структура поверхні. Інструмент Power Honing - це абразивний внутрішнє ЗК, яке сполучається з заготівлею (зовнішнє ЗК). Ковзне осьовий рух перехресних осей видаляє матеріал з бічної поверхні ніжки зуба. Тривимірні відносні руху інструменту Spheric™ Honing забезпечують зменшення припуску, більш тривалий термін служби інструменту, гарна якість заготовок і просту правку геометрії зубів.

Хонінгувальний інструмент Gleason Hurth складається з різних спеціально розроблених абразивних компонентів на основі синтетичної смоли. Хонінгувальний інструмент виготовляється і правиться за допомогою точного алмазного (зовнішнього) еталона; правка проводиться через запрограмовані інтервали часу для підтримки постійної якості. Шліфувальні кола розроблені відповідно до запатентованої Gleason Hurth технологією, націленої на балансування умов зачеплення і контакту між шліфувальним кругом, заготівлею та алмазної правкою протягом всього терміну служби шліфувального круга.

Порівняння з виробниками-конкурентами наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Reishauer	Gleason			
1.	<b>Економічні</b> (Малі капіталовкладення, незначна кількість оплати праці)				-	-	+
2.	<b>Технічні</b> (Габарити пристрою, простота конструкції)				-	-	+
3.	<b>Надійності</b> (Відсутність великої кількості елементів)				-	-	+
4	<b>Технологічні</b> (Можливість обробки зубчастих коліс певного модулю), (Універсальність)				+	-	+
5	Експлуатаційні (Стабільність роботи)		Хон	Хон	-	+	-

## 5.4 Технологічний аудит ідеї проекту

### 5.4.1 Технологічна здійсненність ідеї проекту

Технологія виготовлення продукту є одним з ключових факторів успішності ідеї на ринку. Для зубохонінгування, як правило, застосовують хони, які обробляють зубчасте колесо методом обкату.

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Інструмент, який дозволить обробляти велику кількість зубчастих коліс одного модулю	Технологія 1 реалізації цього пристрою така: Інструмент закріплюється на верстаті для оброблення зубчастих коліс разом із зубчастим колесом, в інструмент додають МАП і осьовим обертальним рухом здійснюється зубохонінгування	Технологія нова.	Повністю доступна
		Технологія 2 реалізації цього пристрою така: Інструмент закріплюється на верстаті для оброблення зубчастих коліс разом із зубчастим колесом, в пристрій додають МАП і ексцентричним обертальним рухом здійснюється зубохонінгування	Технологія нова.	Повністю доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Технологія 1				

Висновок. Розглянувши можливі варіанти забезпечення ідеї проекту обрано Технологію 1.

### 5.5 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз попиту, його наявність, обсяг, динаміка розвитку ринку наведено в табл. 5.4.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	3..5
2	Загальний обсяг продаж, ум.од/рік (Україна)	1,5..2 млн у.о.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Особливі соціально-економічні умови
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Не виявлено
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25..50

Таким чином, можна зробити висновок, що на ринку не так багато наявних гравців, що пропонують продукцію з високою додатковою вартістю. Незважаючи на нестабільну ситуацію в країні об'єми ринків авіа та верстатобудування в Україні. Попри занепад більшості державних підприємств на підприємствах приватних відбувається перехід до більш сучасного обладнання.

Вхід на український ринок українського виробника є досить простим. Навіть враховуючи присутність світових компаній-лідерів через значні показники девальвації національної валюти будь-яке внутрішнє виробництво має перевагу перед імпортерами. Таке підприємство на внутрішньому ринку може виступати і в ролі експортера. Адже в сучасних економічних умовах це дозволяє конкурувати і за межами країни. Слід взяти до уваги і високу додаткову вартість виробників-конкурентів.

Потенційні групи клієнтів, їх характеристики та перелік вимог то товару наведено в табл. 5.5

Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Універсальний інструмент	Підприємства, які знаходяться в великих містах	Акцент на зменшенні витрат за рахунок універсальності інструменту. Мала собівартості операції.	- до компанії-постачальника: можливість швидкої доставки
2	Малі затрати у часі	Автомобілебудування, машинобудування.	Акцент на високій швидкості оброблення інструменту.	- до продукції: висока точність та якість - до компанії-постачальника: можливість забезпечити устаткуванням належної якості.

## 5.6 Аналіз ринкового середовища

Нижче наведено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. №№ 5.5 – 5.6).

Таблиця 5.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Загальний спад попиту на оброблену продукцію	Зміна технології виготовлення зубчастих коліс	Розробка нового устаткування для обробки або нової технології виготовлення зубчастих коліс.
2	Залежність від постачальників деталей для устаткування	Невелика кількість постачальників деталей регулюють ринок, володіють значною переговорною силою.	Довгострокова співпраця з постачальниками, створення взаємовигідних умов співпраці.
3	Нове устаткування	Поява нового пристрою, який буде коштувати дешевше.	Перегляд технології виготовлення та вдосконалення обладнання
<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Вдосконалення власного інструменту	Універсальність, підвищення показників ефективності	Постійний розвиток технологій

Продовження Таблиці 5.6 – Фактори можливостей

2	Вихід на нові ринки	Збільшення об'єму продажів, співпраця з новими підприємствами та країнами.	Пошук нових ринків збуту та партнерів
3	Впровадження франшиз, філіалів та відділів в різних регіонах	Створення власних центрів сервісу, обслуговування та виготовлення продукції, розвиток об'ємів виробництва	Своєчасне проведення аудиторських та маркетингових досліджень

Загальні риси конкуренції на ринку наведено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції олігополія	На ринку представлені переважно великі міжнародні компанії, їх кількість невелика. Практично відсутні малі підприємства.	Боротьба за галузі на які завжди буде попит там де великі компанії мають дуже високу ціну.
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Компанії виробники представлені в різних країнах світу.	Розвиток логістичних і транспортних систем.

Продовження Таблиці 5.7 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

3. За галузевою ознакою внутрішньогалузева	Переважно виробники спеціалізуються на виготовленні хонів. В меншій мірі присутня міжгалuzeва конкуренція.	Концентрація над конкретними ідеями.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Найбільшого значення має призначення товару.	Представлення на ринку різних видів хонів.
5. За характером конкурентних переваг - цінова/не цінова	Конкуренція як за рахунок перспективних технологій так і за рахунок зниження цін.	Забезпечити компромісне рішення
6. За інтенсивністю - марочна	На ринку висока роль бренду.	Приділити увагу маркетинговій компанії для впізнаваності на ринку.

Перелік факторів конкурентоспроможності наведено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Оригінальна ідея створення універсального інструменту	Розглянутий інструменту відрізняється від інших виготовлених своєю універсальністю



Продовження Таблиці 5.8 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

2	Швидкість обробки	Даний інструмент дозволяє обробити зубчасте колесо за досить короткий час.
3	Відсутність конкурентів всередині країни	Мінімальна залежність цін на внутрішньому ринку від курсу валют, затрат на транспортування тощо.
4	Поєднання ефективних методів обробки	МАО комплексно покращує якісні характеристики зубчастих коліс, тоді як інші методи покращують тільки один або декілька показників

Висновок. З огляду на конкурентну ситуацію вихід ідеї на ринок можливий, проте слід розраховувати на ті галузі, де конкуренти мають найменший вплив.

## 5.7 SWOT-аналіз

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 5.9) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.6 – 5.7).

Таблиця 5.9 – SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- позитивне ціноутворення на внутрішньому ринку;</li> <li>- прогресивна конструкція пристрою;</li> <li>- ефективний технологічний процес;</li> <li>- малий час обробки;</li> <li>- мала вартість роботи інструменту.</li> </ul>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- відсутність власної сировинної бази;</li> <li>- висока частка імпорту для забезпечення виробництва;</li> <li>- складність виходу на нові ринки;</li> </ul>
<p><b>Можливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Вдосконалення власної науково-технічної бази;</li> <li>- Вихід на нові ринки;</li> </ul>	<p><b>Загрози:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Загальний спад попиту на продукцію;</li> <li>- можливість створення нового обладнання;</li> </ul>

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.10).

Таблиця 5.10 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Забезпечення надійних і незалежних постачальників продукції	Невелика кількість виробників, що спеціалізуються на випуску деталей, не складають конкуренції на ринку (Китай). Логістичні системи та об'єми продукції розвинуті на високому рівні.	2..4 місяці.
2	Освоєння власного заготівельного виробництва.	Велика кількість виробників деталей, на внутрішньому ринку також.	Для досягнення конкурентної точності необхідно 2..4 роки
3	Вихід на нові ринки збуту (міжнародні)	Можливо за умов розвитку об'ємів виробництва та маркетингу.	2..5 років

**Висновок.** В результаті аналізу можна зробити висновок, що освоєння власного заготівельного виробництва є перспективним і дало б змогу бути незалежними в питанні заготовок. Проте це потребує значних наукоємних затрат та часу для реалізації, що на початкових етапах є недоцільним. Тому обрано альтернативний шлях – розвиток відносин з виробниками потрібних нам деталей для пристрою, що не є конкурентами на ринку верстатобудування.

## 5.8 РОЗРОБКА РИНКОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ

### 5.8.1 Опис цільових груп споживачів

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.11).

Таблиця 5.11 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачі в сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Підприємства, які займаються виготовленням зубчастих коліс.	Зацікавлені	Високий	Висока, не цінова	Доступно
2	Авіаційна, аеро-космічна галузі, автомобілебудування, приладобудування	Зацікавлені	Середній	Висока, не цінова	Складно доступно
3	Ремонтні заводи, майстерні, депо і т.п.	Зацікавлені	Середній	Цінова, порівняно низька	Доступно
Які цільові групи обрано: Авіаційна, аеро-космічна галузі, автомобілебудування.					

Висновок. За результатами аналізу потенційних груп споживачів прийнято стратегію диференційованого маркетингу.

## 5.8.2 Стратегія конкурентної поведінки

Результат аналізу наведено в табл. 5.12.

Таблиця 5.12 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «періопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
1	Проект пропонує один із способів вирішення відомих проблем, дуже близький до вже відомих.	Пошук і розвиток клієнтської бази є одним з основних аспектів розвитку компанії.	Спільні характеристики товару продиктовані чинними стандартами та нормами підприємств.	<b>заняття конкурентної ніші</b>

**Висновок.** Стратегія заняття конкурентної ніші є найбільш актуальною, тому що за наведених технологій та конструкції інструменту знижується його собівартість. Це відкриває нові можливості для клієнтів, які раніше не користувались даним різновидом пристроїв (дає змогу застосовувати нові матеріали, оптимізувати технологічні процеси, знизити витрати тощо). Такі ніші є не освоєними конкурентами і цей факт дозволяє зарекомендувати себе на ринку.

## 5.9 РОЗРОБЛЕННЯ МАРКЕТИНГОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРОЕКТУ

### 5.9.1 Маркетингова концепція товару

Формування маркетингової концепції товару наведено в табл. 5.13.

Таблиця 5.13 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Універсальність інструменту	Простий та якісний інструмент малих розмірів	-Відсутність додаткової вартості товару; -Низькі логістичні витрати
2	Висока швидкість оброблення	Досить висока швидкість оброблення	-Якісне зубчасте колесо без сколів та мікронерівностей

Продовження Таблиці 5.13 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

3	Не платити за новий інструмент	Не використовувати старі хони.	-Швидкість обробки -Пристрій може освоїти не висококваліфікований робітник
---	--------------------------------	--------------------------------	---

### 5.9.2 Визначення цінових меж товару

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.14.). Аналіз проводиться експертним методом.

Для порівняння за одиницю ціни прийнято вартість устаткувань компаній конкурентів – 40000 грн., а за новий пристрій – 15000 грн.

Таблиця 5.14 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
	0.05..0.8	0.9..1.5		0,65..0,95

**Висновок.** Цінові межі встановлено таким чином, щоб запропонований товар міг охоплювати як конкурентні галузі, так і нові, де використовують товари-замінники.

### 5.9.3 Визначення оптимальної системи збуту

Визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.15)

Таблиця 5.15 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
	Надають вибір постачальникам з широким асортиментом продукції та логістичною доступністю	Забезпечення в необхідних об'ємах різних підприємств-клієнтів.	В межах регіону, країни	Власна система збуту

**Висновок.** Обрано використання власної системи збуту для безпосереднього контакту з клієнтом. За потреби допускається використовувати залучену систему збуту.

**Висновок:**

1. Рентабельність проекту, яка сягає 25...50% також присутність попиту на ринку, який є постійно зростаючим;
2. Проект є перспективним оскільки потенційні користувачі це весь спектр виробництв де присутнє фінішне оброблення зубчастих коліс, що дає можливість широкого впровадження в машинобудівну галузь;
3. Проект є конкурентоспроможним, проте можуть виникнути проблеми на початкових етапах розвитку через те, що метод та послуга мало відома, що насторожить клієнтів.
4. Для впровадження проекту для виходу на ринок доцільно залучення інвесторів, щоб надати більших оборотів проекту. Строк реалізації 2..4 місяці.
5. Розвиток проекту є доцільним оскільки ринок збуду постійно зростає за рахунок відкриття нових підприємств по виготовленні зубчастих коліс.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ**

Було проведено аналіз відомих методів фінішної обробки зубчастих коліс. Не дивлячись на досягнення у розвитку методів, а також інструментів фінішної обробки зубів зубчастих коліс, результати обробки все ж таки мають свої недоліки при використанні будь-якого з них.

Основними недоліками найчастіше всього становляться похибка профілю отриманого після обробки зуба зубчастого колеса, швидке зношення оброблюючого інструмента, невисока швидкість обробки, а найголовніше це необхідність в спеціальному обладнанні.

Тому було розроблено та виготовлено новий інструмент для МАО фінішної обробки зубів зубчастих коліс методом безперервного обкату. Виготовлений інструмент є досить універсальним, простим у використанні та за його конструкцією і може використовуватись на різних верстатах.

Практично було доведено, що дисковий інструмент для фінішної обробки зубів зубчастих коліс є роботоздатним, це можна побачити за зміною виміряної шорсткості поверхні зубів зубчастого колеса, яке було оброблене цим інструментом.

## **Джерела використаної літератури**

- 1.** Калашников А. С. Зубчатые колеса и их изготовление / А. С. Калашников, С. Н. Калашников. – Москва: Машиностроение, 1983. – 264 с. – (Машиностроение).
- 2.** Калашников А. С. Технология изготовления зубчатых колес / А. С. Калашников. – Москва: Машиностроение, 2004. – 480 с. – (Машиностроение).
- 3.** Гаврушкевич А. Ю. Основні положення кінематики МАО циліндричних зубчастих коліс : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Гаврушкевич Андрій Юрійович – Киев, 2016. – 303 с.
- 4.** Якимов А.В. Прерывистое шлифование. - К.:О.: Вища шк., 1986.- 175 с.
- 5.** Якимов О.О. Технологічне забезпечення якості поверхневого шару зубів високоточних зубчастих коліс при шліфуванні: дис... докт. техн. наук: 05.02.08 / Якимов Олексій Олександрович. - Одеса – 2015. 800 с.
- 6.** Ящерицын П.И. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: учебник для студентов вузов / П.И. Ящерицын, М.Л. Еременко, Е.Э. Фельдштейн. - Минск: Вышэйшая школа, 1990. - 512 с. : ил.
- 7.** ГОСТ 1643-81. Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые цилиндрические. Допуски. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1985. – 70 с.
- 8.** Калашников П.А. Повышение эффективности изготовления цилиндрических зубчатых передач за счет применения процесса непрерывного обкатного зубошлифования с радиально-диагональным движением подачи: автореф. дисс. на соискание научн. степени канд. техн. наук: 05.02.08 / П.А. Калашников. – Москва, 2009. – 23 с.
- 9.** Зинченко В.М. Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки / Зинченко В.М. - М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.- 303 с
- 10.** Ванин В.А. Точность кинематических цепей металлорежущих станков: Учебное пособие / В.А. Ванин, А.Н. Колодин, В.Х. Фидаров. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО "ТГТУ". 2011. – 188 с
- 11.** ГОСТ 31381-2009. Колеса зубчатые. Виды повреждений. Классификация и описание. - Минск: БелГИСС, 2009. - 70 с.
- 12.** Сухоруков Ю. Н. Инструменты для обработки зубчатых колес методом свободного обката / Ю. Н. Сухоруков, Р. И. Евстигнеев. – Киев: Техніка, 1983. – 120 с. – (Техніка).
- 13.** Гульда Э. Н. Технология отделочных операций зубообработки цилиндрических колес / Э. Н. Гульда. – Львов: Вища школа, 1977. – 168 с.



- 14.** Гейчук В.М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. ...докт. техн. наук: 05.03.01 / Гейчук Володимир Миколайович. - Київ, 2012. – 472 с
- 15.** Дерев'янка І.С. Стан і аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням // Вісн. Нац. Ун-ту "Львівська політехніка". Сер. Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. - 2007. - № 583. - С. 18-24.
- 16.** Афтаназів І. Вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на чистоту зміцненої бокової поверхні зубів / І. Афтаназів, І. Юрчишин, О. Клименко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ, вип. № 14, 2003. с. 106-118
- 17.** Кабатов А.А. Анализ финишных методов обработки поверхностным пластическим деформированием // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2013. -№ 58. - С. 49-54.
- 18.** Клименко О.Д. Підвищення довговічності силових зубчастих передач вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Клименко Олександр Дмитрович; Луцький держ. технічний унт, Національний ун-т "Львівська політехніка". - Л., 2004. - 298 арк.
- 19.** Клименко О.Д. Експериментальні дослідження впливу конструктивних параметрів зміцнювача на силу деформування при зміцненні зубчастих коліс загартованими кульками / О.Д. Клименко, Е.Л. Селезньов Е.Л., В.С. Пуць // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2014, №1 С. 62-67.
- 20.** Амитан Г.Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г.Л. Амитан, И. А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; Под общ. ред. В.А. Волосатова. — Л. Машиностроение. Ленингр. отделение, 1988. - 719 с.
- 21.** Багмутов В.П. Электромеханическая обработка: технологические и физические основы, свойства, реализация /В.П. Багмутов, С.Н. Паршев, Н.Г. Дудкина, И.Н. Захаров; Под ред. В.Е. Громова, Э.В. Козлова. - Новосибирск: Наука, 2003. - 317 с.
- 22.** Гах В.М. Эффективность применения различных технологий виброабразивной обработки твердосплавного инструмента / Гах В.М., В.А., Пальцев, И.О Гах // Вібрації в техніці та технологіях. - № 4 (56).-2009. С. 75-81.
- 23.** Зверовщиков А.В. Совершенствование технологии шпиндельной обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Зверовщиков Анатолий Владимирович. - Пенза, 2004. – 274 с.

- 24.** Калмиков М.О. Инструмент для обработки деталей вільними абразивами: монографія/М.О. Калмиков, Т.О. Шумакова, В.Б. Струтинський, Л.М. Лубенська. - Луганськ: вид-во "Ноулідж", 2010. – 214 с.
- 25.** Лосев А.В. Необходимость использования отделочно-зачистных технологий в машиностроении [Текст] / А.В. Лосев, О. А. Лосева, Ю. С. Дмитриевская // Металлообработка. – Вып.1(49). – Спб., 2009.– С. 2 – 9.
- 26.** Лосева О.А. Обработка кромок золотниковых пар термоимпульсным методом / О.А. Лосева, А.А. Коростелева // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 59. – Харків, 2013. – С. 82 – 88.
- 27.** Лосева О.А. Проблема скругления кромок // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. научных трудов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – Вып. 45. – Харків, 2010. – С. 122 – 128.
- 28.** Лосева О.А. Формирование и отделка кромок деталей машин / О.А. Лосева, И.В. Бычков, А.В. Лосев // Оборудование и инструмент для профессионалов. Серия: Металлообработка. 2013. № 6. С. 74-78.
- 29.** Лосев А.В. Підвищення ефективності зачистки деталей пневматичних і гідропаливних систем при використанні термоімпульсного методу: дис. канд. техн. наук: 05.02.08. - Х., 1995. - 210 с.
- 30.** Лубенская Л.М. Ресурсосберегающая технология изготовления ведущих зубчатых колес тепловозов 2ТЭ10Л / Лубенская Л. М. Колодяжный П.В. // Вібрації в техніці та технологіях. - 2010. № 4 (60). - С. 40-48.
- 31.** Ляшенко Б.А. Основные направления развития поверхностного упрочнения зубчатых колес / Б.А. Ляшенко, Э.К. Посвятенко, С.А. Довжук, Ф.Й. Златопольский // Збірник наукових праць кіровоградського національного технічного університету / Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Вип. 24, ч.ІІ - Кіровоград: КНТУ, 2011. С. 8-12.
- 32.** Мрочек Ж.А. Особенности процесса магнитно-абразивной обработки поверхностей /Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов// Вестник Белорусской государственной политехнической академии. – 2002. - № 2. – С.36- 38.
- 33.** Нечай Е.В. Анализ финишных методов обработки деталей в среде свободных абразивов / Е.В. Нечай, Н.И. Пичугин // Вібрації в техніці та технологіях. - 2010. № 2 (58). - С. 152-166.

- 34.** Обробка деталей при відновленні та зміцненні: Навч. посібник / Ю.О. Харламов, С.А. Клименко, М.А. Будаг'янц, Л.Г. Полонський. – Луганськ: ВУНУ ім. В. Даля, 2007. – 500 с.
- 35.** Руденко П.А. Отделочные операции в машиностроении: Справочник/П.А. Руденко, М.Н. Шуба, В.А. Огнivec и др.: под общей ред. П.А. Руденко. – К.: Техніка, 1985. – 136 с.
- 36.** Рожненко О.А. Изменения съема металла при обработке фасонных поверхностей детали в среде свободного абразива // Инновационные технологии в обучении и производстве: материалы V Всероссийской научнопрактической конференции, 4-6 декабря 2008 г. В 3 т. – Волгоград, 2008. – Т. 2. – С. 101- 104.
- 37.** Тамаркин М.А. Оптимизация технологических процессов обработки деталей свободными абразивами/М.А. Тамаркин, А.И. Азарова //Вестник Донского государственного технического университета. – 2001. – №1(7). – Т.1. – С. 47-55.
- 38.** Тамаркин М.А. Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами. Дисс. ...докт. техн. наук: 05.02.08 / Тамаркин Михаил Аркадьевич. - Ростов-на-Дону. – 1995. 310 с.
- 39.** Пат. 2077413 РФ МПК6 В23F 19/10 Способ снятия заусенцев и скругления острых кромок на зубчатых деталях / Калмыков А.К. 94007039/02, заявл. 24.02.1994; опубл. 20.04.1997.
- 40.** Пат. 2344024 РФ МПК 2006.01 В23F 11/00, В23F 19/06 Способ зубоиглошвейнгования / Степанов Ю.С., Киричек А.В., Тарапанов А.С. и др. 2007117259/02 заявл. 08.05.2007; опубл. 20.01.2009 Бюл. № 2.
- 41.** Пат. 2362664 РФ МПК 2006.01 В24В 39/00, С23С 26/00, В23F 19/02 Способ обработки зубчатой поверхности цилиндрических деталей машин / Белевский Л.С., Тулупов С.А., Тулупов О.Н., Белевский И.Л. 2007131129/02, заявл. 15.08.2007; опубл. 27.07.2009 Бюл. № 21.
- 42.** Jun Qu Abrasive micro-blasting to improve surface integrity of electrical discharge machined WC-Co composite//Jun Qu, Albert J. Shih, Ronald O. Scattergood, Jie Luo. ISSN: 0924-0136 Journal of Materials Processing Technology 166 (2005). Pp. 440-448.
- 43.** Risse K. Einflüsse von Werkzeugdurchmesser und Schneidkantenverrundung beim Bohren mit Wendelbohrern in Stahl, RheinischWestfälischen Technischen Hochschule, Aachen, Dr.-Ing. Diss., 2006.
- 44.** Tikal F. Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung/ F. Tikal, R. Bienemann, L. Heckmann. Kassel University Press GmbH, Kassel. 2009. 193 Seiten.

45. Venkatesh G. On ultrasonic assisted abrasive flow finishing of bevel gears / G. Venkatesh, Apurbba Kumar Sharma n, Pradeep Kumar // International Journal of Machine Tools & Manufacturepp. A1-A2, 1-230 (February 2015). #89 (2015). PP. 29–38.
46. Yussefian N.Z. Cutting Edge Microgeometry Modeling & ElectroErosion Honing / Nima Zarif Yussefian // Phd-Thesis, McMaster University, Hamilton. – Ontario, 2012. – P. 151.
47. <http://elionmost.ru/atl-atl-germaniya>
48. <http://www.atl-luhden.de/index.php/en/>
49. [http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/\\_assets/downloads/shaft\\_seals.pdf](http://net.grundfos.com/doc/webnet/waterutility/_assets/downloads/shaft_seals.pdf); <http://www.grundfos.com>
50. [https://www.otec.de/fileadmin/user\\_upload/mediapool/pdf/Prospekt\\_SF/OTEC\\_Prospekt\\_SF\\_DE.pdf](https://www.otec.de/fileadmin/user_upload/mediapool/pdf/Prospekt_SF/OTEC_Prospekt_SF_DE.pdf)
51. <https://studopedia.org/6-84346.html>.
52. Гавриленко В. А. Зубчатые передачи в машиностроении/ В. А. Гавриленко. - М.: Машгиз, 1962. - 532 с.
53. Залгаллер В. А. Теория огибающих/ В. А. Залгаллер. М. Наука, 1975.- 104 с.
54. Колчин Н. И. Аналитический расчет плоских и пространственных зацеплений/ Н. И. Колчин. - М.: Машгиз, 1949. - 212 с.
55. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений/ Ф. Л. Литвин. - М.: Наука, 1968. – 586 с.
56. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании режущих инструментов/ В. С. Люкшин. - М.: Машиностроение, 1968. - 372 с.
57. Охріменко О. А. Формоутворення поверхні зубчастих косозубих зубчастих коліс при зубофрезеруванні/ Охріменко О. А.// Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – 2013. - №31. - С.38-46.
58. Охріменко О. А. Формоутворення прямозубих зубчастих коліс конічними черв'ячними фрезами/ О. А. Охріменко. //Процеси механічної обробки в машинобудуванні. Збірник наукових праць. – 2013. - №312. - С.98-107.
59. Равська Н. С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці/ Н. С Равська. , П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко, П. П. Мельничук. - Житомир: ЖІТІ, 2001. – 164 с.
60. Равська Н. С. Геометрія спряжених поверхонь. Збірник задач/ Н. С Равська. , П. Р. Родін, Т. П. Ніколаєнко. – Житомир: ЖІТІ, -2001. - 319 с.
61. Равська Н. С. Основи формоутворення поверхонь при механічній обробці/ Н. С. Равська, П. П. Мельничук, Т. П. Ніколаєнко. - К.: Вид. СКД-Друк, 2013. – 215с.

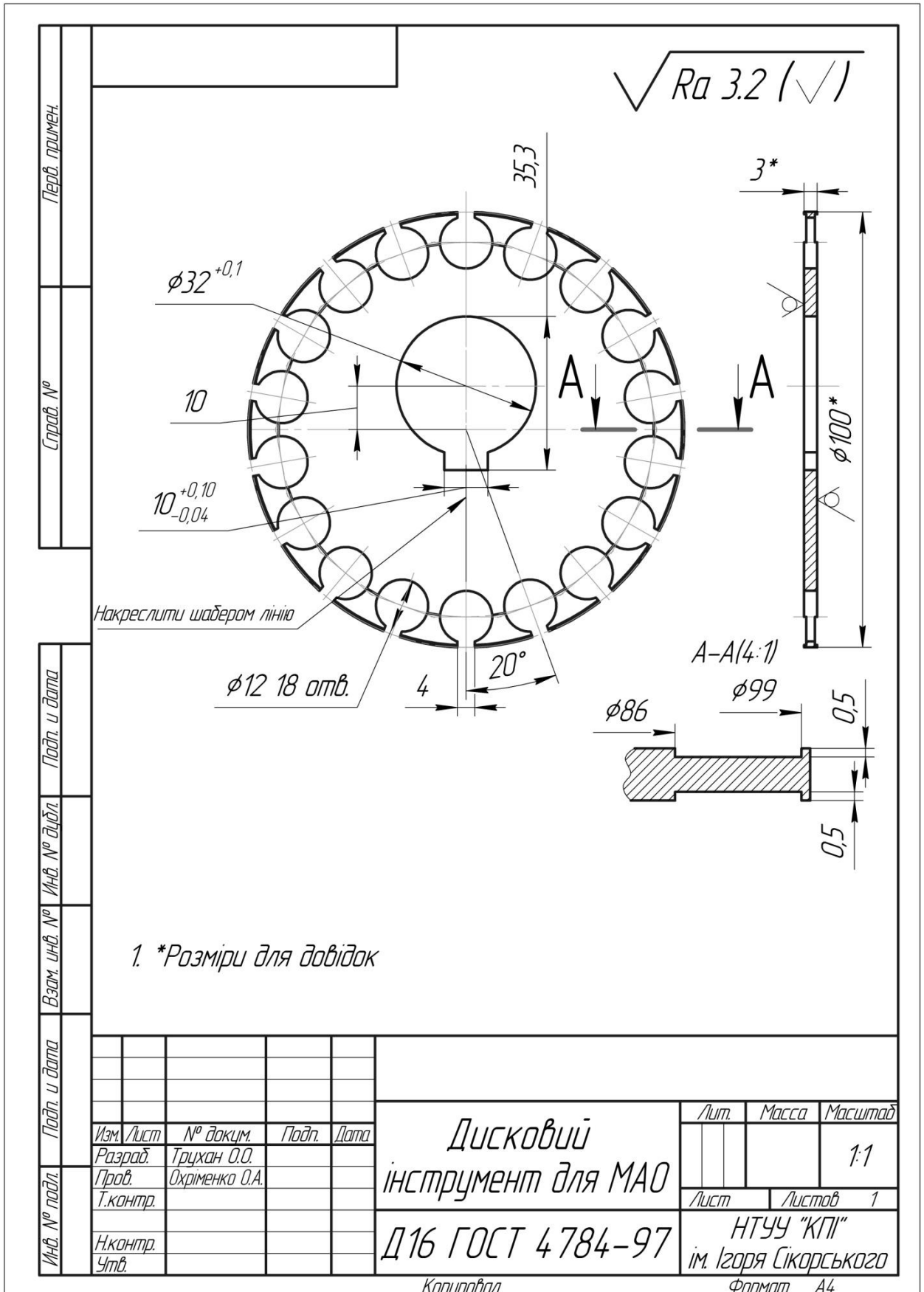
- 62.** Родин П. Р. Основы формообразования поверхностей резанием/ П. Р. Родин. - К.: Выща школа, 1977. – 190 с.
- 63.** Родін П. Р. Різальний інструмент у прикладах і задачах/ П. Р. Родін, Н. С. Равська, Л. І. Ковальова, Р. П. Родін. - К.: Вища школа, 1994. - 294 с.
- 64.** Шевелева Г. И. Теория формообразования и контакта движущихся тел./ Г. И. Шевелева. - М.: Станкин, 1999. - 494с.
- 65.** Faydor L. Litvin. Gear geometry and applied theory. Second edition./ Faydor L. Litvin , Alfonso Fuentes. - Cambridge University Press Cambridge University Press, 2004. – 800 p.
- 66.** Охріменко О. А. ЗАГАЛЬНІ ОСНОВИ ТЕОРІЇ ПРОЕКТУВАННЯ ЧЕРВ'ЯЧНИХ ФРЕЗ : дис. докт. техн. наук : 05.03.01 - Проц / Охріменко Олександр Анатолійович – Київ, 2005. – 323 с.
- 67.** Кривошея А.В. Финишная обработка цилиндрических зубчатых колес алмазными эластичными червячными хонами / А.В. Кривошея, В.Е. Мельник, В.В. Возный, С.В. Рябченко, В.Н. Бычихин, Т.Е. Третьяк // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. Сборник научных трудов. – Вып. 19 – Киев: ИСМ им. В.Н.Бакуля, НАН Украины, 2016. – С. 444 - 450.
- 68.** Грицай І. Є. Теоретико - прикладні основи комплексних наукових досліджень процесу нарізання зубчастих коліс/ І. Є. Грицай. – Львів «СПОЛОМ», 2009. – 254с.
- 69.** Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей. Диссертация ... канд.техн.наук. – Киев, - 1988. – 170 с.
- 70.** Алюминий Д16 [Електронний ресурс] // Центральный металлический портал РФ – Режим доступа до ресурсу: [http://metallischekiy-portal.ru/marki\\_metallov/alu/D16](http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/alu/D16).
- 71.** ГОСТ 6512 – 74
- 72.** Храпін С. І. Магнітно-абразивне оброблення плоских поверхонь індукторами на постійних магнітах : 133 Галузеве ма / Храпін С. І. – Київ, 2018. – 106 с.
- 73.** Полуавтомат зубофрезерный 5В312 Руководство по эксплуатации – г. Витебск: Станкостроительный завод имени Коминтерна, 1975. – 186 с. – (Руководство по эксплуатации).
- 74.** 5В312 Станок зубофрезерный вертикальный полуавтомат схемы, описание, характеристики [Електронний ресурс] // Рубикон ООО. – 2009. – Режим доступа до ресурсу: [http://stanki-katalog.ru/sprav\\_5v312.htm](http://stanki-katalog.ru/sprav_5v312.htm).
- 75.** ВЫБОР И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ НАЛАДКИ ЗУБОФРЕЗЕРНОГО СТАНКА модели 5А312 [Електронний ресурс] //

Лекции.Ком. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <https://lektsii.com/1-162712.html>.

**76.** [https://studopedia.com.ua/1\\_288663\\_tema--zagalni-vidomosti-pro-zubchasti-peredachi.html](https://studopedia.com.ua/1_288663_tema--zagalni-vidomosti-pro-zubchasti-peredachi.html)

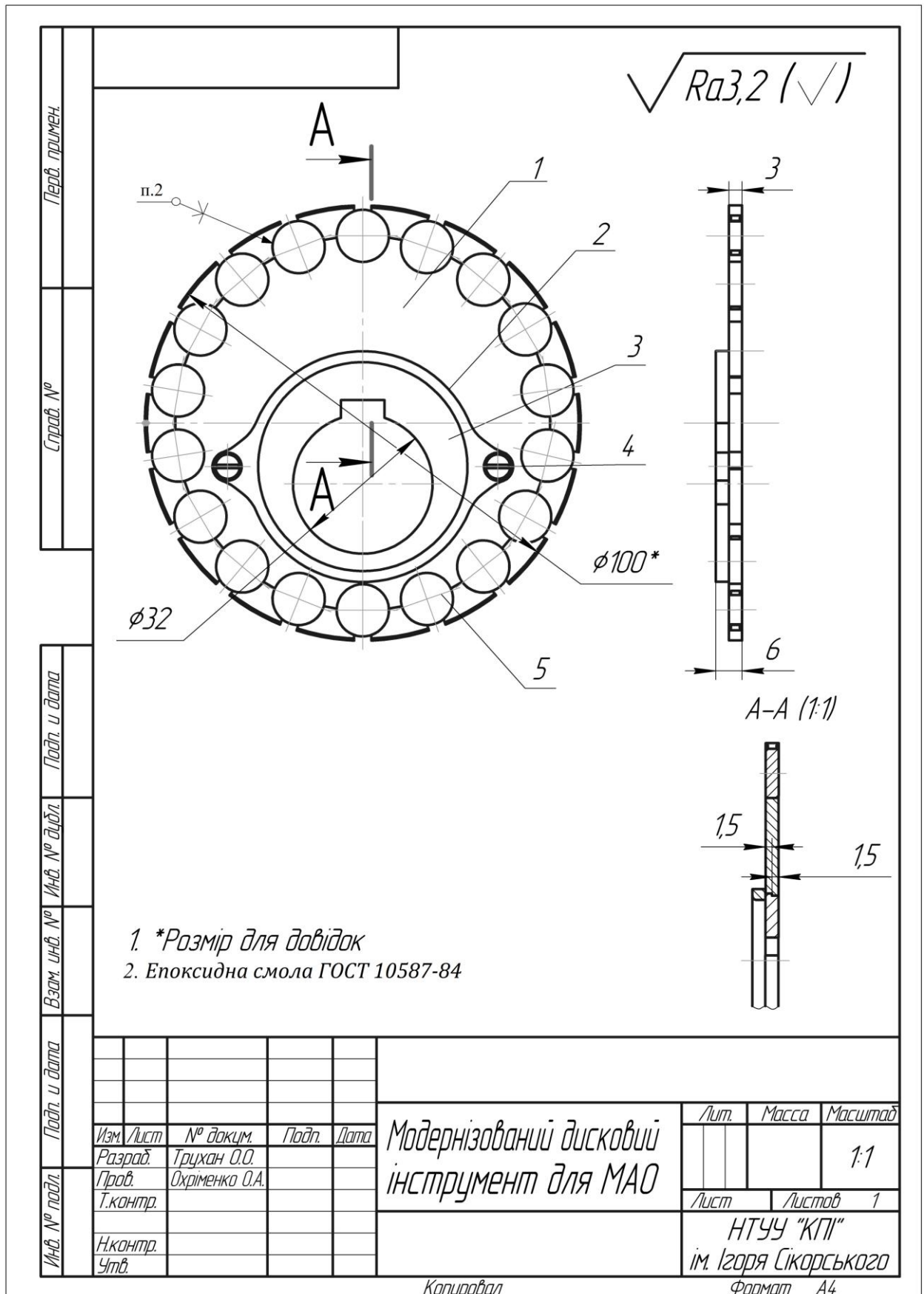
## ДОДАТОК А

Креслення дискового інструмента для МАО зубчастих коліс методом  
безперервного обкату



## ДОДАТОК Б

Креслення модернізованого дискового інструмента для МАО зубчастих коліс  
методом безперервного обкату





Перв. примен.	Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
	A4				Документація		
Справ. №					Складальне креслення	1	
					Деталі		
	A4	1			Диск	1	
	A4	2			Затискна пластина	1	
	A4	3			Ексцентрична втулка	1	
					Стандартні вироби		
	БК	4			Болт МЗх0,5 ГОСТ 17475-80	2	
	БК	5			Неодимовий магніт	18	
Взам. инв. №							
Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Модернізований дисковий інструмент для МАО Копіював _____	
	Разроб.	Трухан О.О.					
	Пров.	Охріменко О.А.				НТУУ "КПІ" ім. Ігоря Сікорського Формат А4	
	Н.контр.						
	Утв.						